

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ORDENACIÓN Y PROPUESTA DE  
RESTAURACIÓN DE LA CUENCA DEL  
RÍO JESÚS MARÍA (CÓRDOBA, ARGENTINA)**

**Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS**

**Autor: MARTÍN EXEQUIEL BUDANO**

**Tutores: DR. JOSÉ ANDRÉS TORRENT BRAVO  
DRA. MARÍA LETICIA LÓPEZ SARDÁ**

***SEPTIEMBRE, 2021***



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** ORDENACIÓN Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA CONCA DEL RÍO JESÚS MARÍA (CÓRDOBA, ARGENTINA)

**Título del TFM en inglés:** ORDINATION AND PROPOSAL OF RESTORATION OF THE BASIN OF THE RIVER JESÚS MARÍA (CÓRDOBA, ARGENTINA)

**Título del TFM en Valenciano:** ORDENACIÓ I PROPOSTA DE RESTAURACIÓ DE LA CONCA DEL RIU JESÚS MARÍA (CÓRDOBA, ARGENTINA)

**Alumno:** MARTÍN EXEQUIEL BUDANO

**Tutor:** DR. JOSÉ ANDRÉS TORRENT BRAVO

**Cotutor/es:** DRA. M<sup>a</sup> LETICIA LÓPEZ SARDÁ,

**Fecha de Lectura:** SEPTIEMBRE, 2021

### Resumen

#### En español

La cuenca hidrográfica del río Guanusacate o río Jesús María ubicada al norte de la Provincia de Córdoba Argentina, por condicionamiento natural presenta una significativa tendencia a la generación de crecientes repentinas debido básicamente a la morfología de su cuenca alta en donde predominan rocas cristalinas poco permeables, sobre las que evolucionaron suelos superficiales con una cubierta vegetal de baja protección hidrológica. Por otra parte, en la cuenca media y baja, la vegetación nativa ha sido reemplazada para su explotación agrícola lo que trae aparejado una disminución sustancial en la infiltración y aumento en la escorrentía, generando procesos de erosión hídrica acelerada en todas sus formas.

Los fenómenos torrenciales comienzan a originarse a partir de los caudales recogidos en la parte alta de la cuenca, y los daños aumentan con la cantidad de sedimentos transportados por la corriente hacia aguas abajo. Estos sedimentos

proceden de la erosión, tanto de las laderas de los distintos cauces como de su propio lecho. La cuenca alta, con una superficie de 460,61 Km<sup>2</sup>, tiene una gran importancia ante estos fenómenos, de forma que cuanto menores sean los caudales y sedimentos aportados a los cauces de los barrancos, menor será el riesgo y severidad de las inundaciones.

Otro inconveniente de importancia son los reiterados incendios forestales que reducen la protección del suelo a la erosión y aumentan la cantidad de sedimentos arrastrados de la cuenca alta hacia la cuenca media y baja, donde la pendiente se reduce de manera considerable, obstruyendo la red de drenaje y provocando desbordes que afectan a una amplia región productiva.

Es por lo antes expuesto, que el objetivo de este estudio se centrará en buscar paliativos y soluciones a corto y largo plazo para subsanar los severos problemas de erosión hídrica e inundaciones que se vienen produciendo en los últimos años. Estas soluciones se llevarán a cabo mediante la restauración hidrológico-forestal de la cuenca alta del río Jesús María, a partir de un estudio integral que permitirá llevar a cabo la ordenación de la misma (actuaciones no estructurales) y medidas de tipo estructural (Biotecnias e hidrotecnias) con la finalidad de reducir la tasa de erosión hídrica, y al mismo tiempo el riesgo de inundación en la cuenca media y baja.

El objetivo ambicioso de este estudio, con escasos precedentes en la Provincia de Córdoba, es que no solo se implemente en esta cuenca, sino en todas aquellas que tengan problemas de esta índole. Estas estrategias traerían aparejados beneficios no solo sociales y económicos (por disminuir las pérdidas de vidas humanas y materiales) sino también beneficios ecológicos al permitir restaurar los bosques y su biodiversidad.

### **En valenciano**

La conca hidrogràfica del riu Guanusacate o riu Jesús Maria, ubicada al nord de la Província de Córdoba (Argentina), per condicionament natural presenta una significativa tendència a la generació de crescudes sobtades degut bàsicament a la morfologia de la seva conca alta on predominen roques cristal·lines poc permeables, sobre les que van evolucionar sòls superficials amb una coberta vegetal



de baixa protecció hidrològica. Per altra banda, en la conca mitjana i baixa, la vegetació nativa ha estat substituïda per a l'exploració agrícola, la qual cosa provoca una disminució substancial en la infiltració i l'augment en l'escorrentia, generant processos d'erosió hídrica accelerada en totes les seves formes.

Els fenòmens torrencials comencen a originar-se a partir dels cabals recollits a la part alta de la conca, i els danys augmenten amb la quantitat de sediments transportats pel corrent aigües avall. Aquests sediments provenen de l'erosió, tant dels costats dels diferents canals com del seu propi llit. La conca alta, amb una superfície de 460,61 Km<sup>2</sup>, té una gran importància davant d'aquests fenòmens, de forma que quan més baixos siguin els cabals i sediments aportats als costats del barrancs, menor serà el risc i severitat de les inundacions.

Un altre inconvenient de rellevància són els reiterats incendis forestals que redueixen la protecció del sòl a l'erosió i augmenten la quantitat de sediments arrossegats de la conca alta cap a la conca mitjana i baixa, on el pendent es redueix de manera considerable, obstruint la xarxa de drenatge i provocant desbordaments que afecten una àmplia regió productiva.

És per això que l'objectiu d'aquest estudi se centrarà a buscar pal·liatius i solucions a curt i llarg termini per rectificar els greus problemes d'erosió hídrica i inundacions que s'han anat produint els darrers anys. Aquestes solucions es portaran a terme mitjançant la restauració hidrològica-forestal de la conca alta del riu Jesús Maria, a partir d'un estudi integral que permetrà dur endavant la seva ordenació (actuacions no estructurals) i mesures de tipus estructural (Biotècnies i hidrotècnies) amb la finalitat de reduir la taxa d'erosió hídrica, i al mateix temps el risc d'inundació en la conca mitjana i baixa.

L'ambiciós objectiu d'aquest estudi, amb escassos precedents a la Província de Còrdoba, és que no solament siga implementat a aquesta conca, sinó en totes aquelles que tinguen problemes semblants. Aquestes estratègies portaran beneficis

socials i econòmics (per disminuir les pèrdues de vides humanes i materials), i també beneficis ecològics en permetre restaurar els boscos i la seva biodiversitat.

### **En inglés**

The watershed of the Guanusacate River or Jesús María River, located in the north of the Province of Córdoba (Argentina), naturally presents a significant tendency for sudden flooding due to the morphology of its upper basin, where little permeable crystalline rocks predominate, on which soils with a vegetation cover of low hydrological protection evolved. On the other hand, in the middle and lower basins, native vegetation has been replaced for agricultural purposes, which produces a substantial decrease in infiltration and an increase in runoff, generating accelerated water erosion in all its forms.

Torrential phenomena begin to originate from the flows collected in the upper part of the basin, and the damage increases with the amount of sediment transported downstream. These sediments come from erosion, both from slopes and from their own bed. The upper basin, with an area of 460.61 km<sup>2</sup> has a great importance in the face of these phenomena and that the lower the flows and sediments contribute to the ravines, the lower the risk and severity of flooding.

Another major drawback is the repeated forest fires which reduce soil protection against erosion and increase the amount of sediments carried over from the upper basin into the middle and lower basin, where the slope is considerably reduced, obstructing the drainage network and causing overflows affecting a large productive region.

It is for the above reasons that the objective of this study will focus on seeking palliatives and short- and long-term solutions to correct the severe problems of water erosion and floods that have been occurring in recent years. These solutions will be carried out through the hydrological-forest restoration of the upper basin of the River Jesús María, from a comprehensive study that will allow to carry out the management of structural and non-structural actions with the aim of reducing the rate of water erosion and at the same time the risk of flooding in the middle and lower basin.



The ambitious objective of this study, with few precedents in the Province of Córdoba, is that it is not only implemented in this basin, but in all those that have problems of this nature. These strategies would not only bring social and economic benefits (by saving lives and reducing damage) but also ecological benefits by enabling forests and their biodiversity to be restored.

**Palabras clave español (máximo 5):** Restauración Hidrológico-

Forestal / Erosión hídrica / Torrencialidad / Biotecnias / Hidrotecnias

**Palabras clave valenciano:** restauració Hidrològic-

Forestal / Erosió hídrica / torrencialitat / Biotècnies / hidrotècnies

**Palabras clave inglés:** Hydrological Restoration-

Forestry / Water erosion / Torrentiality / Biotechnics / Hydrotechnics

## **Agradecimientos**

*A mis padres, por su apoyo incondicional; por escucharme y motivarme siempre que me hizo falta. Además, por darme fuerzas y alentarme a seguir superándome.*

*Mi más profundo agradecimiento a mis tutores, José Andrés y Leticia, por su dedicación, predisposición y pasión con la que enseñan, la cuál me ha inspirado y entusiasmado para hacer este trabajo.*

*A mis hermanos, que siempre estuvieron pendientes de cada paso que daba y me animaron a seguir siempre para adelante.*

*Y por supuesto, a todas esas personas que siempre estuvieron cerca mío, más allá de la distancia; como a todas aquellas que he tenido la suerte de haberme cruzado en esta nueva etapa de mi vida.*

¡Simplemente... GRACIAS!



## Índice General Del Estudio

### A- DOCUMENTO 1- MEMORIA

- ANEXO 1.- ESTADO DE LA CUENCA DE ESTUDIO.

### B- DOCUMENTO 2- PLANOS

- PLANO Nº1- UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.
- PLANO Nº2 - FACTOR CULTIVO y ORDENACIÓN "C" EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº3 - FACTOR EROSIONABILIDAD DEL SUELO "K" EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº4 - FACTOR LLUVIA "R" (Índice de Erosión Pluvial) EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº5 - FACTOR LONGITUD Y PENDIENTE "L x S" EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº6 - ELEVACIONES EN LA CUENCA RÍO DEL JESÚS MARÍA
- PLANO Nº7 - EROSIÓN HÍDRICA REAL EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA.
- PLANO Nº8 - EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº9 - ORDENACIÓN DE LA RED HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA DE ACUERDO CON EL MÉTODO DE STRAHLER
- PLANO Nº10 - EROSIÓN HÍDRICA REAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº11 - EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL EN CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº12 - VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº13 – PENDIENTES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº14 - VOCACIÓN DEL USO DE SUELO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº15 - ORDENACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº16 – ELEVACIONES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº17 - EXPOSICIÓN SOLAR EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA
- PLANO Nº18 - HIDROTECNIAS DE CORRECCIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA

# Índice memoria

## ■ ÍNDICE

<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>19</b>
1.1. INTRODUCCIÓN AL ÁREA DE ESTUDIO .....	20
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>25</b>
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>26</b>
3.1. SITUACIÓN .....	26
3.2. GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y SUELOS .....	27
3.2.1. Montaña .....	28
3.2.2. Piedemonte .....	30
3.2.3. Ambiente de Planicie .....	31
3.3. CLIMA .....	32
3.3.1. Nivel Provincial .....	32
3.3.2. Nivel de Cuenca .....	33
3.4. VEGETACIÓN .....	34
3.4.1. Nivel Provincia .....	34
3.4.2. Nivel Cuenca .....	36
3.5. FAUNA .....	39
3.6. ORGANISMOS ENCARGADOS DE LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE .....	39
3.7. ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS .....	42
3.8. ESTADO FORESTAL .....	43
3.8.1. PRINCIPALES ESPECIES DE ÁRBOLES .....	46
3.8.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	47
3.8.2. INCENDIOS FORESTALES .....	55
3.8.3. RED VIARIA Y BARRERAS CORTAFUEGO .....	60
3.8.4. ACTUACIONES SOBRE LA MASA FORESTAL EXISTENTE .....	61
3.9. ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES .....	62
3.10. SÍNTESIS DE LA HISTORIA DEL CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN LAS SIERRAS CHICAS .....	69
3.10.1. PERÍODO PREHISPÁNICO .....	69
3.10.2. PERÍODO COLONIAL .....	69
3.10.3. PERÍODO MODERNO .....	70
3.11. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS .....	71
3.11.1. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN .....	71
3.11.2. CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN .....	73
<b>4. HIDROLOGÍA</b> .....	<b>74</b>
4.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL .....	74
4.1.1. Cuenca Hidrográfica .....	74
4.1.2. Hidrograma .....	76



## ■ ÍNDICE

4.1.3.	Probabilidad (P) y Tiempo de Retorno (Tr) .....	77
4.1.4.	Tormentas de Diseño.....	77
4.1.4.	Tiempos de concentración.....	81
4.1.5.	Hietogramas de proyecto.....	84
4.1.6.	Proceso de transformación Lluvia-Caudal.....	88
4.1.6.1.	Precipitación Efectiva .....	89
4.1.7.	Modelo Hidrológico .....	91
4.1.8.	Resultados del modelo .....	92
4.2.	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CUENCA .....</b>	<b>95</b>
4.2.1.	Parámetros de Forma .....	96
4.2.1.1.	Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc) .....	96
4.2.1.2.	Factor de Forma (F) de Horton (1932) .....	97
4.2.1.3.	Relación de elongación (Schumm, 1956).....	97
4.2.1.4.	Relación de circularidad de Miller (1956) .....	97
4.2.2.	Parámetros del relieve .....	98
4.2.2.1.	Pendiente media .....	99
4.2.2.2.	Curva hipsométrica:.....	99
4.2.3.	Parámetros relativos a la red de drenaje.....	101
4.2.3.1.	Orden de la cuenca: .....	101
4.3.	<b>EROSIÓN HÍDRICA.....</b>	<b>103</b>
4.4.	<b>HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>111</b>
4.4.1.	<b>SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LAS SIERRAS DE CÓRDOBA .....</b>	<b>112</b>
4.4.1.1.	Acuífero en medio fracturado .....	113
4.4.1.2.	Acuíferos sedimentarios .....	114
4.4.1.3.	Acuíferos en Pampa de altura .....	114
5.	<b>ORDENACIÓN DE LA CUENCA.....</b>	<b>115</b>
5.1.	ANTECEDENTES: .....	115
5.2.	OBJETIVOS: .....	115
5.3.	CRITERIO DE ORDENACIÓN:.....	116
5.3.1.	PÉRDIDAS DE SUELO: .....	116
5.3.2.	POR PENDIENTE.....	117
5.4.	VOCACIÓN USO DE SUELO .....	118
5.5.	ORDENACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LA CUENCA .....	118
6.	<b>RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL.....</b>	<b>121</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN .....	121

## ■ ÍNDICE

6.2.	ANTECEDENTES .....	122
6.3.	OBJETIVOS .....	125
6.4.	ESTADO LEGAL .....	133
6.4.1.	Nivel Nacional .....	133
6.4.2.	Nivel Provincial .....	134
6.5.	MORFOLOGÍA .....	135
6.5.1.	RELIEVE .....	135
6.5.2.	ESTUDIO DE EXPOSICIONES.....	138
6.6.	BIOTECNIAS DE RESTAURACIÓN.....	138
6.6.1.	DEFINICIÓN DE UNIDADES DE ACTUACIÓN .....	139
6.6.2.	DEFINICIÓN DE ESPECIES A IMPLEMENTAR .....	140
6.6.2.1.	Descripción de especies de pinos para la repoblación .....	142
6.6.2.2.	Listado definitivo de especies a implementar en la repoblación. ....	146
6.6.3.	PREPARACIÓN DEL TERRENO .....	147
6.6.4.	MÉTODO DE IMPLANTACIÓN DE LA VEGETACIÓN Y DENSIDAD DE PLANTACIÓN .....	150
6.6.5.	TRABAJOS COMPLEMENTARIOS A LA PLANTACIÓN .....	152
6.6.6.	TRABAJOS SILVÍCOLAS SOBRE LA VEGETACIÓN EXISTENTE .....	155
6.6.7.	TRATAMIENTOS DE PREVENCIÓN CONTRA INCENDIOS .....	159
6.6.8.	DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS BIOLÓGICOS REALIZAR .....	160
6.7.	HIDROTECNIAS DE RESTAURACIÓN .....	164
6.7.1.	ESTADO LEGAL.....	165
6.7.2.	TIPOS DE HIDROTECNIAS DE CORRECCIÓN DE CAUCES .....	165
6.7.3.	OTROS TIPOS DE HIDROTECNIAS .....	171
6.7.3.1.	RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS .....	173
6.7.3.2.	PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO.....	176
6.7.4.	HIDROTECNIAS PROPUESTAS .....	182
7.	CONCLUSIONES .....	186
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	187



## Índice figuras

Figura 1: Ubicación de la cuenca (en rojo) del río Guanusacate en la Provincia de Córdoba, Argentina; Laguna Mar Chiquita (en azul). Fuente: Elaboración propia. ....	21
Figura 2: Cuenca Hidrográfica del Río Jesús María (en color amarillo) y Cuenca Alta del Río Jesús María (Área donde se centrará el estudio de este trabajo, en color Rojo). ....	22
Figura 3: Cuenca donde se centrará el estudio, formada por la subcuenca del río Ascochinga (subcuenca sur) y subcuenca del río Santa Catalina (subcuenca norte). ....	22
Figura 4: Elevaciones de la cuenca alta del río Guanusacate. ....	27
Figura 5: Izquierda: Paisaje de Crestas. Derecha. Cuerpos intrusivos filoneanos. Cuenca. Santa Catalina. Fuente: Relevamiento de campo realizado por INA-CIRSA. ....	29
Figura 6: Izquierda Cuerpo granítico globular. Derecha Relleno coluvio aluvial. Fuente: Informe nº1 Estudio Geo-Hidrológico Del Río Guanusacate En Su Paso Por El Área Urbana De Jesús María-INA-CIRSA. ....	29
Figura 7: Izquierda Suelos residuales. Derecha Roca desnuda aflorante en cuenca alta. Fuente: relevamiento de campo realizado por INA-CIRSA. ....	30
Figura 8: Precipitación media anual de la Provincia de Córdoba (mm) 1961-1990 (De La Casa & Ravelo, 2003). ....	32
Figura 9: Temperaturas medias de Enero (C°) 1961-1990. (De La Casa & Ravelo, 2003). ....	33
Figura 10: Temperaturas medias de Julio (C°) 1961-1990 (De La Casa & Ravelo, 2003). ....	33
Figura 11: Temperatura y precipitación media mensual para la localidad de Río Ceballos en el período 1991-2000. Fuente: Cooperativa de vivienda, Provisión de Obras, Servicios públicos, Asistenciales y Otros Servicios Río Ceballos Limitada y la Fuerza Aérea Argentina. ....	34
Figura 12: Regiones Fitogeográficas de la República Argentina. En color rojo se señala la ubicación de la Provincia de Córdoba. (Mainardi, 2013) ....	36
Figura 13: Ejemplos representativos de los principales tipos de coberturas en la cuenca de estudio (Gavier-pizarro & Período, 2004). ....	38
Figura 14: Ubicación de la Reserva natural de la defensa Ascochinga. En color rojo se indica la ubicación tentativa del Dique Carapé (no ejecutado), Fuente: Sala de prensa ambiental. ....	43
Figura 15: Ubicación de la Reserva hídrica natural Parque la Quebrada (en color Amarillo) con respecto a la ubicación de la cuenca de estudio (en color rojo). ....	46
Figura 16: Coco ( <i>Zanthoxylum coco</i> ). ....	47
Figura 17: Molle ( <i>Lithraea molleoides</i> ). ....	48
Figura 18: Algarrobo Blanco ( <i>Prosopis alba</i> ). ....	49
Figura 19: Algarrobo Negro ( <i>Prosopis nigra</i> ). ....	50
Figura 20: Quebracho blanco ( <i>Aspidosperma quebracho blanco</i> ). ....	50
Figura 21: Tala ( <i>Celtis tala</i> ). ....	51
Figura 22: Espinillo de hábito arbóreo (izquierda) y espinillo de hábito arbustivo (derecha). ....	52

Figura 23: Chañar ( <i>Geoffroea decorticans</i> ).....	53
Figura 24: Garabato ( <i>Acacia praecox</i> ) .....	54
Figura 25: Porción de las Sierras Pampeanas de Argentina ubicadas en la Provincia de Córdoba. En color rojo se indica la cuenca de estudio. Fuente: Tesis Doctoral titulada: Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz. ....	56
Figura 26: Áreas quemadas y frecuencia de incendios del periodo 1999-2011 en las Sierras de Córdoba, Argentina. En color magenta se indica la cuenca de estudio. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz. ....	58
Figura 27: Red Viaria de la cuenca alta del río Guanusacate.....	61
Figura 28: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1986. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 29: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1990.Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 30: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1994.Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 31: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1998. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 32: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2002. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 33: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2006. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 34: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2010. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 35: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2014. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 36: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2018. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 37: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2021. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 38: Bosque ubicado en la parte alta de la cuenca de estudio donde se diferencian tres parcelas que permitirían explicar la geometría no natural del mismo.....	68
Figura 39: Evolución de la Población para las Localidades dentro de la cuenca de estudio. ....	72
Figura 40: Ubicación de las localidades dentro de la cuenca de estudio. ....	73
Figura 41: Procesos hidrológicos principales del ciclo del agua en una cuenca hidrográfica. ....	75
Figura 42 – Delimitación de cuenca y sentido general del escurrimiento. Fuente: Secretaría de Recursos Hídricos, Ministerio de Servicios Públicos. ....	76
Figura 43 - Hidrograma típico generado por una cuenca hidrográfica. ....	77
Figura 44 – Mapa de zonificación pluvial de la Provincia de Córdoba. Con el circulo de color azul se indica la zona de estudio. ....	80
Figura 45: Estaciones utilizadas para la modelación hidrológica en la cuenca alta del Río Jesús María. En donde es posible también observar la división en 4 subcuencas realizada para una mejor representación de la realidad con el modelo hidrológico. ....	81
Figura 46: Hietograma para lluvia de 120 min y TR=25 años.....	85



Figura 47: Hietograma para lluvia de 360 min y TR=25 años.....	86
Figura 48:Hietograma para lluvia de 120 minutos y tiempo de retorno de 100 años. ....	87
Figura 49: Hietograma para lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 100 años. ....	88
Figura 50: Esquema modelo HMS. ....	92
Figura 51: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un Tr=25 años y duración de lluvia de 2 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:46,2 m <sup>3</sup> /s. ....	93
Figura 52: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un Tr=25 años y duración de lluvia de 6 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:136,9 m <sup>3</sup> /s. ....	93
Figura 53: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un Tr=100 años y duración de lluvia de 2 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca: 80,3 m <sup>3</sup> /s. ....	94
Figura 54: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un Tr=100 años y duración de lluvia de 6 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:207,10 m <sup>3</sup> /s. ....	94
Figura 55: Delimitación de la cuenca en estudio con sus principales subcuencas. Fuente: INA-CIRSA.....	95
Figura 56: Histograma de frecuencias de la pendiente y cálculo de la pendiente media. Fuente: elaboración propia. ....	99
Figura 57: Curva hipsométrica para la Subcuenca Santa Catalina. Fuente: INA-CIRSA.....	100
Figura 58: Curva hipsométrica para la Subcuenca Ascochinga. Fuente: INA-CIRSA.....	100
Figura 59: Esquema de orden de la red de drenaje de acuerdo con el método de Strahler. ....	102
Figura 60: Orden de cursos de agua mediante el uso de Arc Gis. ....	102
Figura 61: Ordenación de la red hídrica de la cuenca alta del río Jesús María de acuerdo con el método de Strahler. ....	103
Figura 62: Relación entre la precipitación media anual (PMA) y el factor de erosividad de las lluvias (R) para 75 localidades de la República Argentina. Fuente: Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina.....	107
Figura 63: Efecto de la pendiente y su longitud en la pérdida de suelo por erosión hídrica (Wischmeier et al., 1965).....	109
Figura 64: Esquema de relaciones hidrogeológicas entre medio fracturado y medio poroso clásico, en valles serranos. Fuente: Cabrera & Matteoda, 2014. ....	113
Figura 65: Ejemplo de curvas de nivel en la cuenca de estudio. ....	122
Figura 66: Se realizaron microembalses de retardo para paliar el efecto negativo de las crecientes. Fuente: <a href="http://www.semanarioprimerdia.com.ar/2016/06/reanudand-ejecucion-de-micro-embalses-de.html">http://www.semanarioprimerdia.com.ar/2016/06/reanudand-ejecucion-de-micro-embalses-de.html</a> .....	123
Figura 67:El gobierno de la provincia de Córdoba pretendió construir un dique sobre el río Carapé, cerca de la localidad de Ascochinga. Fuente: <a href="https://periodismoambiental.com.ar/carape-el-dique-que-no-fue/">https://periodismoambiental.com.ar/carape-el-dique-que-no-fue/</a> .....	125
Figura 68: Incendios en la cuenca alta del río Guanusacate. Fuente: <a href="http://radiojesusmaria.com.ar/2020/10/19/bomberos-combaten-focos-en-varios-puntos-de-las-sierras-la-situacion-a-esta-hora/">http://radiojesusmaria.com.ar/2020/10/19/bomberos-combaten-focos-en-varios-puntos-de-las-sierras-la-situacion-a-esta-hora/</a> .....	126

Figura 69: Estado de algunas viviendas en la Ciudad de Jesús María luego de las fuertes crecidas en el río Guanusacate en el año 2015. Fuente: Diario La Voz del Interior. ....	127
Figura 70: Estado de algunas viviendas y márgenes del río Jesús María luego de las fuertes crecidas del año 2015. Fuente: Diario La Voz del Interior. ....	128
Figura 71: Rotura del estribo y losa de acceso al puente en ruta Nacional nº9 que vincula Jesús María con Sinsacate. Fuente: <a href="https://www.conclusion.com.ar/info-general/mas-danos-al-puente-que-une-jesus-maria-y-sinsacate/02/2015/">https://www.conclusion.com.ar/info-general/mas-danos-al-puente-que-une-jesus-maria-y-sinsacate/02/2015/</a> .....	128
Figura 72: Partes de una cuenca torrencial. ....	131
Figura 73: Cuenca alta del Río Guanusacate con sus cursos de agua. ....	133
Figura 74: Mapa de ordenación territorial creado por el COTBN. Fuente: <a href="https://sites.google.com/site/leydebosquescordoba/el-proyecto-de-la-cotbn">https://sites.google.com/site/leydebosquescordoba/el-proyecto-de-la-cotbn</a> .....	135
Figura 75: Clasificación del Relieve. Fuente: INA CIRSA. ....	136
Figura 76: Caracterización comparativa del Relieve por Cuenca. alturas y pendientes (%). Fuente: INA CIRSA. ....	137
Figura 77: Exposición solar en la cuenca alta del río Jesús María. ....	138
Figura 78: Pino ellioti ( <i>Pinus ellioti</i> ). ....	142
Figura 79: Pino taeda ( <i>Pinus taeda</i> ).....	143
Figura 80: Pino radiata ( <i>Pinus radiata</i> ).....	144
Figura 81: Pino ponderosa ( <i>Pinus ponderosa</i> ).....	145
Figura 82: Pino pátula ( <i>Pinus patula</i> ) .....	146
Figura 83: Retroaraña. ....	149
Figura 84: Miniretroexcavadora. ....	149
Figura 85: Plántula a raíz desnuda. ....	150
Figura 86: Plántula con cepellón. ....	150
Figura 87: Hoyadoras para tractor. ....	152
Figura 88: Implementos surcadores para tractor .....	152
Figura 89: Uso de hidrogeles. ....	154
Figura 90: Ejemplo de una plántula de pino dentro de un tubo protector, con alcorque y castillete de piedras. ....	155
Figura 91: Desbrozadora de cadena accionada por tractor. ....	157
Figura 92: Motodesbrozadora con disco triturador. ....	158
Figura 93: Astilladora forestal. ....	158
Figura 94: Corrección de torrente mediante diques y albarradas. Fuente: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785">https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785</a> .....	165
Figura 95: Componentes de un dique tipo. Fuente: Elaboración propia. ....	167
Figura 96: Localización de albarrada más eficiente según pendiente longitudinal de curso de agua o cárcava. Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012. ....	168



Figura 97: Fajinas. Criterios constructivos (D=diámetro; L=longitud; H= Altura). Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012.....	170
Figura 98: Fajinas. Criterios constructivos. Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012. ....	170
Figura 99: Corrección de cauce mediante umbrales de fondo. Fuente: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785">https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785</a> .....	171
Figura 100: Cuencas de la Vertiente Oriental de las Sierras Chicas. Provincia de Córdoba, Argentina. Fuente: (Chiavassa et al., 2017).....	173
Figura 101: Ejemplo de barrera viva para la conservación de suelo. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central .....	177
Figura 102: Ejecución de tabiques en acequias para optimizar la distribución de agua en la parcela. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central. ....	179
Figura 103: Barreras de postes para la retención de sedimentos y acarreos. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central.....	181

## Índice tablas

Tabla 1: Principales especies de árboles en la cuenca de estudio. ....	47
Tabla 2: Número de incendios, área quemada total y efectiva en las Sierras de Córdoba durante el periodo 1999 - 2011. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz. ....	59
Tabla 3: Área quemada efectiva para cada frecuencia de incendios del periodo 1999 –2011 en las Sierras de Córdoba. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz. ....	59
Tabla 4: Proporción (%) de cada cubierta de suelo quemada entre 1999 y 2011 en cuatro sistemas serranos de la Provincia de Córdoba. Los porcentajes se calcularon a partir del área quemada efectiva. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz. ....	60
Tabla 5: Censos de población para localidades comprendidas dentro de la cuenca de estudio y variación (%) de la población entre los años 1991 y 2010. ....	72
Tabla 6: Zonas pluviográficas consideradas para Córdoba y estaciones base. Fuente: INA-CIRSA. ....	79
Tabla 7: Parámetros físicos de las subcuencas. ....	83
Tabla 8: Tiempo de concentración de las subcuencas. ....	84
Tabla 9: Lluvia de 120 minutos y Tiempo De Retorno de 25 años. ....	85
Tabla 10: Lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 25 años. ....	86
Tabla 11: Lluvia de 120 minutos y tiempo de retorno de 100 años. ....	87
Tabla 12: Lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 100 años. ....	88
Tabla 13: Numero de Curva (Soil Conservation Service) ....	91
Tabla 14: Parámetros de las dos subcuencas principales. Fuente: Elaboración propia. ....	96
Tabla 15: Factor Kc. ....	97
Tabla 16: Parámetros de forma para las subcuencas principales. ....	98
Tabla 17: Parámetros de relieve de la cuenca y subcuencas. Fuente: INA-CIRSA. ....	98
Tabla 18: Valores del Factor C para distintos tipos de usos de suelo. ....	110
Tabla 19: Criterio de ordenación de cuenca por pérdidas de suelo, según método USLE. ....	117
Tabla 20: Criterio de ordenación de cuenca por pendiente, según García Nájera. ....	118
Tabla 21: Ordenación hidrológico-forestal de la cuenca del río Guanusacate. ....	120
Tabla 22: Resultado de la ordenación de la cuenca y superficies por medidas a adoptar. ....	121
Tabla 23: Especies elegidas para la repoblación forestal. ....	147
Tabla 24: Resultado de la restauración hidrológico-forestal de la cuenca y superficies por medidas a adoptar. ....	160
Tabla 25: Distancia entre obras de conservación de suelo según el porcentaje de la pendiente. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central. ....	178



## Índice ecuaciones

Ecuación 1: Tiempo de retorno .....	77
Ecuación 2: Tc según Método racional generalizado .....	82
Ecuación 3: Tc según Temez .....	82
Ecuación 4: Tc según Pilgrim y McDermott .....	82
Ecuación 5: Tc según Bransby-Williams .....	83
Ecuación 6: Tc según SCS.....	83
Ecuación 7: Hipótesis del método del SCS.....	89
Ecuación 8: Lámina de lluvia efectiva .....	89
Ecuación 9: Máxima retención potencial.....	90
Ecuación 10: Coeficiente de compacidad de Gravelius.....	96
Ecuación 11: Factor de Forma de Horton .....	97
Ecuación 12: Relación de elongación (Schumm, 1956) .....	97
Ecuación 13: Relación de circularidad de Miller (1956) .....	98
Ecuación 14: Erosión hídrica actual determinada mediante modelo USLE.....	105
Ecuación 15: Índice de erosividad para un evento .....	106
Ecuación 16: Erosividad de la lluvia .....	106
Ecuación 17: Aproximación del Factor R. ....	107
Ecuación 18: Ecuación de Wishmeier para la obtención del factor K.....	108
Ecuación 19: Longitud de la pendiente. ....	109
Ecuación 20: Pendiente.....	109
Ecuación 21: Tensión tractiva ( $t \cdot m^{-2}$ ), donde $\gamma$ es el peso específico de agua ( $t \cdot m^{-3}$ ), R es el radio hidráulico de una sección (m) e l es la pendiente del cauce(m/m). ....	131
Ecuación 22: Radio hidráulico.....	131

## 1. ANTECEDENTES

Uno de los desafíos más relevantes que afronta la humanidad es el control de la degradación de los recursos naturales y principalmente la degradación de los suelos. En la República Argentina ,alrededor de 2000 millones de hectáreas están deterioradas en forma irreversible y de las 1500 millones en uso actualmente, una tercera parte poseen procesos degradatorios de moderados a graves, que afectan anualmente entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierra productiva (Gaitán, Navarro, Vuegen, et al., 2017).

En grandes superficies de Argentina se ha observado en las últimas décadas un incremento en la tasa de erosión hídrica producido principalmente por los cambios en los usos del suelo, falta de rotación en los cultivos, monocultivo, desmonte y el sobrepastoreo en regiones secas. La intensa y cada vez más acelerada pérdida de bosques nativos que se registra a escala mundial constituye uno de los problemas ambientales más graves a comienzos del siglo XXI. El problema se acentúa en los países subdesarrollados donde las masas forestales están disminuyendo rápidamente, particularmente en los trópicos (R. Repetto, Kio, 1988). La pérdida alcanza tasas anuales del 0,6% en África, 0,9% en Asia y 0,7% en Sudamérica, debido sobre todo a la expansión de la agricultura. La deforestación ocasiona además cambios en el ambiente físico (erosión y pérdida de suelo), alteraciones en el clima local, regional y global, en el ciclado de nutrientes y en los regímenes hidrológicos (Gavier-pizarro & Período, 2004).

En Argentina la pérdida de bosques ha alcanzado una magnitud muy significativa, particularmente en las selvas subtropicales y el Chaco. Entre 1990 y 2000 se perdieron 2.851.000 hectáreas de bosques (el 7,6% del total existente en 1990) a una tasa del 0,8% anual. Esta tasa de deforestación es una de las más altas registradas en Sudamérica (FAO ,2001). En la provincia de Córdoba la deforestación ha alcanzado niveles similares, particularmente en el bosque chaqueño del norte de la provincia y el bosque serrano de Córdoba (donde se centrará el estudio) (L. E. Hoyos et al., 2013).

Por otro lado, la variabilidad climática que se viene registrando, con incremento tanto de sequías extendidas, como de lluvias intensas, potencia la acción erosiva de la lluvia y del viento. Además, influyen en gran medida en la conservación del suelo los



incendios de bosques y pastizales, las malas prácticas de laboreo y la escasa adopción de medidas de conservación del suelo.

Según estimaciones de la FECIC (Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura), actualmente un 36 % del territorio argentino está afectado por procesos de erosión hídrica y eólica lo cual representa unos 100 millones de hectáreas en total.

### 1.1. INTRODUCCIÓN AL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Jesús María o río Guanusacate ubicada al norte de la Provincia de Córdoba (Figura 1) tiene problemas severos de erosión hídrica por lo que será tomado como caso de estudio para este Trabajo Fin de Máster. Dicha cuenca tiene el mismo nombre que la reconocida ciudad de Jesús María la cual es atravesada por dicho río en sentido Oeste-Este y termina desembocando en la laguna Mar Chiquita. La laguna Mar Chiquita, o Mar de Ansenusa, es una laguna endorreica de elevada salinidad con superficie variable, que ronda los 8000 km<sup>2</sup>, lo que la convierte en uno de los lagos salados más extensos del hemisferio sur y occidental.

La unidad hidrológica en donde se centrará el estudio está ubicada al oeste de la mancha urbana antes mencionada y comprende la cuenca alta del río Jesús María comprendida por la superficie que reúne las aguas de los Ríos Ascochinga y Santa Catalina, cuya confluencia da origen al Río Guanusacate (Figura 2 y Figura 3).



Figura 1: Ubicación de la cuenca (en rojo) del río Guanusacate en la Provincia de Córdoba, Argentina; Laguna Mar Chiquita (en azul). Fuente: Elaboración propia.

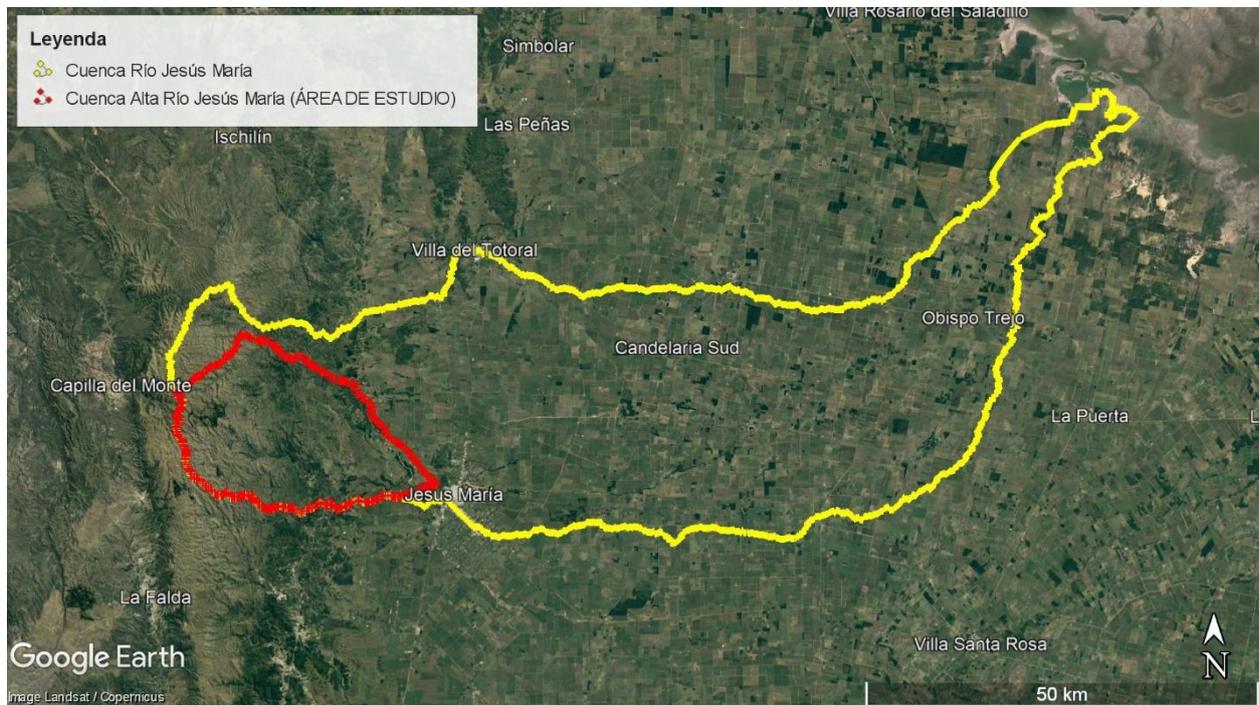


Figura 2: Cuenca Hidrográfica del Río Jesús María (en color amarillo) y Cuenca Alta del Río Jesús María (Área donde se centrará el estudio de este trabajo, en color Rojo).



Figura 3: Cuenca donde se centrará el estudio, formada por la subcuenca del río Ascochinga (subcuenca sur) y subcuenca del río Santa Catalina (subcuenca norte).

La cuenca hidrográfica del río Guanuscate, por condicionamiento natural, presenta

una significativa tendencia a la generación de crecientes repentinas debido básicamente a la morfología de su cuenca alta en donde predominan rocas cristalinas poco permeables, sobre las que evolucionaron suelos superficiales con una cubierta vegetal de baja protección hidrológica (Barbeito et al., 2017). Por otra parte, en la cuenca media y baja, la vegetación nativa ha sido reemplazada para su explotación agrícola lo que trae aparejado una disminución sustancial en la infiltración y aumento en la escorrentía, generando procesos de erosión hídrica acelerada en todas sus formas. Como agente disparador de esta dinámica hidrológica se destacan las precipitaciones intensas y localizadas ligadas a células convectivas favorecidas por el efecto orográfico (INA-CIRSA et al., 2017).

Los fenómenos torrenciales comienzan a originarse a partir de los caudales recogidos en la parte alta de la cuenca, y los daños aumentan con la cantidad de sedimentos transportados por la corriente hacia aguas abajo. Estos sedimentos proceden de la erosión, tanto de las laderas de los distintos cauces como de su propio lecho. La parte alta de la cuenca tiene una gran importancia ante estos fenómenos, de forma que cuanto menores sean los caudales y sedimentos aportados a los cauces de los barrancos, menor será el riesgo y severidad de las inundaciones. Otro inconveniente para destacar es que la gran cantidad de sedimentos arrastrados de la cuenca alta hacia la cuenca media y baja, donde la pendiente se reduce de manera considerable, obstruyendo la red de drenaje y provocando desbordes que afectan a una amplia región productiva. Como paliativo la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, perteneciente al Ministerio de Servicio Públicos, realiza constantes trabajos de mantenimiento (ver anexo 1, Estado de la Cuenca de estudio, dentro del Documento 1. Memoria) tales como dragados en el cauce, conformación de terraplenes, etc. pero que no solucionan la problemática de manera definitiva.

El principal problema de la cuenca alta del río Guanusacate radica en el elevado índice de erosión que posee, debido principalmente a las fuertes pendientes, baja permeabilidad del suelo y escasa vegetación, que facilita el arrastre del suelo por las escorrentías generadas. Este problema se ve agravado por la recurrencia de los incendios forestales, en muchos casos, difíciles de extinguir debido a la mala accesibilidad, escasa presencia de infraestructuras para la extinción de los mismos y la falta de tratamientos selvícolas de la masa forestal existente. Los reiterados



incendios junto con los fenómenos torrenciales han provocado una denudación de la capa superficial del suelo y un arrastre del mismo, quedando incluso, en algunas zonas, la roca al descubierto.

La zona de estudio ha venido sufriendo numerosas avenidas e inundaciones a lo largo del tiempo, que han provocado cuantiosos daños económicos y humanos, destacando en especial al fenómeno hidrológico registrado durante febrero del 2015. Este evento hidrológico provocó una marcada erosión en ambas márgenes del río y el colapso del terraplén de acceso norte al puente que une la ciudad de Jesús María con Sinsacate, por medio de la Ruta Nacional nº9. Además durante dicho evento se registró un saldo de 150 personas que fueron evacuadas por anegamiento de sus viviendas, 4 víctimas fatales y cuantiosas pérdidas materiales que al día de la fecha aún no se han podido cuantificar (Mariana Pagot, 2017).

Estos daños podrían aumentar en un futuro muy próximo debido al crecimiento de la superficie sometida a la actividad humana en la zona, lo que se plantea la necesidad de estudiar actuaciones para la protección frente a fenómenos torrenciales, reduciendo en la medida de lo posible el riesgo de inundación.

A lo largo de los últimos años se han venido ejecutando distintos proyectos de conservación de suelos, en especial en la cuenca media del río Jesús María, consistentes principalmente en micro embalses de retardo como también de técnicas de conservación de suelo conocidas como "curvas de nivel". Estas últimas consisten en marcar en el terreno, con la ayuda de maquinaria, líneas de igual altitud con la finalidad de controlar la erosión hídrica y la escorrentía, aumentar la infiltración del agua precipitada y por tanto incrementar la humedad en el suelo. Estas actuaciones son técnicamente correctas y acertadas, aunque siguen siendo insuficientes para poder controlar los procesos erosivos activos.

Para poder comprender el alto índice de erosión y la problemática antes mencionada, es necesario recurrir a la historia del cambio del uso del suelo en el área de estudio. De esta manera, será más fácil interpretar como una sucesión de cambios asociados a la actividad del hombre, a lo largo de muchos años, pueden producir un gran deterioro ambiental. Además en el anexo 1, Estado de la Cuenca, se puede observar

en imágenes las consecuencias de la gran cantidad de sedimentos acarreados desde la cuenca alta, los cuales obstruyen la red de drenaje y producen constantes inundaciones.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo que se pretende en este trabajo fin de máster es determinar una serie de actuaciones en la cuenca alta del río Guanusacate de tipo estructural y no estructural, que permitan mitigar los riesgos potenciales ante inundaciones como la ocurrida en el año 2015, reducir daños e impactos sobre los habitantes y disminuir los gastos públicos en mantenimiento de cauces.

Por otro lado, el objetivo principal que persigue este estudio es la restauración hidrológico-forestal de la cuenca del río Guanusacate, a partir de un exhaustivo estudio integral de la misma, que permita establecer un conjunto de actuaciones de tipo biológico e hidrotécnico, cuyo desarrollo es de gran interés desde los puntos de vista social, económico, técnico y ecológico.

Mediante este estudio integral de la cuenca y las medidas propuestas se pretende lograr:

- Protección del escaso suelo en la cabecera de cuenca, donde actualmente se encuentran únicamente pastizales y una elevada pedregosidad.
- Protección y defensa de cultivos e infraestructuras frente a la erosión hídrica, contra inundaciones y depósitos excesivo de sedimentos.
- Aumento en la recarga de acuíferos, que permitirá un mejor aprovechamiento de las aguas subterráneas.
- Incremento de las masas forestales, con el consecuente beneficio, no sólo hidrológico, sino también de producción, ecológico y paisajístico.
- Ordenación de los usos del suelo, con el consiguiente aumento de la productividad en la cuenca.
- Disminuir el riesgo de incendios, como también de superficies quemadas, mediante la implementación de tratamientos a la vegetación para la prevención contra incendios.



### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1. SITUACIÓN

La cuenca del río Guanusacate con una superficie de 3.005 Km<sup>2</sup>, situada al norte de la Provincia de Córdoba, se asienta principalmente sobre los departamentos de Totoral y Río Primero y en menor proporción en Ischilín, Colón, Punilla y Tulumba (Figura 1).

El estudio en este trabajo se centró en la cuenca alta del río Jesús María definida por la unidad hidrológica, cuyo punto de cierre del sistema, se encuentra ubicado en la confluencia de los ríos Santa Catalina y Ascochinga y da origen a el río Guanusacate. De esta manera quedaron definidas dos subcuencas principales (Figura 3) denominadas subcuenca Santa Catalina, al norte, y subcuenca Ascochinga, al sur. El justificativo de porque se centró el estudio en esta región fue debido a que allí se presentaron los valores más altos de erosión hídrica calculados mediante la ecuación USLE que es el acrónimo para Universal Soil Loss Equation, es decir, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, que se explicará de manera detallada más adelante en el documento (específicamente en el apartado 4.3. Erosión Hídrica).

Para definir, delimitar y caracterizar la cuenca de estudio se utilizaron imágenes satelitales “Alos Palsar” de 12,5 metros de resolución, obtenidas de la web de la NASA<sup>1</sup> que fueron procesadas con programas informáticos en plataforma SIG.

La cuenca alta del río Guanusacate cuenta con una superficie de 420,61 Km<sup>2</sup>, altitud máxima de 1.885 msnm en el extremo oeste, sobre el cordón montañoso denominado Sierras Chicas y una altitud mínima de 574 msnm, en la confluencia del Río Santa Catalina y Ascochinga.

---

<sup>1</sup><https://search.asf.alaska.edu/#/>

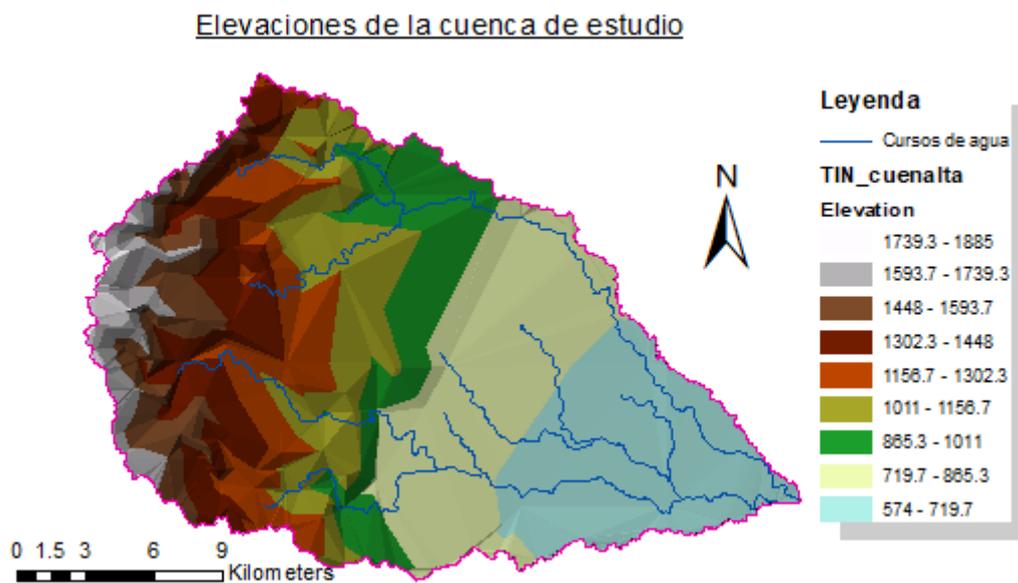
Las coordenadas de los puntos límite extremos norte, sur, este y oeste de la cuenca son:

- Coordenadas punto situado más al norte: Latitud= 30°47'55.08"S; Longitud= 64°21'40.30"O.

- Coordenadas punto situado más al sur: Latitud= 31° 0'5.87"S; Longitud= 64°17'32.67"O.

- Coordenadas punto situado más al este: Latitud= 30°58'15.63"S; Longitud= 64° 6'56.83"O.

- Coordenadas punto situado más al oeste: Latitud= 30°54'3.95"S; Longitud= 64°26'36.08"O.



*Figura 4: Elevaciones de la cuenca alta del río Guanusacate.*

### 3.2. GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y SUELOS

El sistema hidrográfico del Río Jesús María se desarrolla en tres tipos de ambientes diferentes:

- ✚ Montaña
- ✚ Piedemonte
- ✚ Planicie



### 3.2.1. Montaña

Las Sierra Chicas se corresponden con un lineamiento de bloques cristalinos en dirección N-S que se ajustan al estilo tectónico de las Sierras Pampeanas, con levantamiento por fallamiento regional fuerte hacia el oeste y basculamiento más tendido en dirección este (Barbeito et al., 2017).

La cuenca alta de la zona de estudio que actúa como el área de captación de las subcuencas que conforman el Río Guanusacate, se desarrolla en la vertiente Este tendida del macizo. La topografía en respuesta a la tectónica y la disección generada por los cursos de agua varía de accidentada en interfluvios a fuerte y muy fuerte en quebradas producto de la debilidad del sustrato rocoso por efecto de fallas y fracturas. El alzamiento diferencial y basculamientos de bloques menores en el macizo, ha dado lugar a valles estructurales secundarios elongados de fondo plano-cóncavo (Barbeito et al., 2017).

El material geológico se corresponde con un basamento cristalino antiguo en el que se alternan rocas metamórficas e ígneas. Entre las primeras dominan gneises y en la segundas, granito y granodiorita. La masividad de las rocas cristalinas solo se ve interrumpida por diaclasado, fracturación y fallamiento, lo que define permeabilidad secundaria baja (Catalini et al., 2017).

Entre los 1500 y 1200 msnm se desarrolla una faja de intrusivos filonianos<sup>2</sup> (aplitas y pegmatitas) de dirección NO-SE, que por erosión diferencial determinan un paisaje de crestas por su mayor resistencia (Figura 5).

---

<sup>2</sup> Las rocas filonianas o subvolcánicas son rocas ígneas intrusivas que se originan cuando el magma se abre paso hacia la superficie a través de filones y se solidifica en su interior.



*Figura 5: Izquierda: Paisaje de Crestas. Derecha. Cuerpos intrusivos filoneanos. Cuenca. Santa Catalina. Fuente: Relevamiento de campo realizado por INA-CIRSA.*

En las zonas de altitud alta y media también en alternancia con la faja filoneana, se destacan cuerpos intrusivos graníticos globulares (Figura 6). Completan el marco sedimentos coluvio-aluviales con o sin cubierta loésica que rellenan los valles estructurales secundarios de fondo plano (Catalini et al., 2017).



*Figura 6: Izquierda Cuerpo granítico globular. Derecha Relleno coluvio aluvial. Fuente: Informe nº1 Estudio Geo-Hidrológico Del Río Guanusacate En Su Paso Por El Área Urbana De Jesús María- INA-CIRSA.*

Los suelos desarrollados sobre el sustrato geológico por efecto de meteorización mecánica y química son residuales superficiales (50-60 cm.) alternantes con valores variables de roca desnuda según el tipo litológico. Sobre las rocas ígneas el porcentaje



de roca desnuda es del orden del 30% y disminuye a 10%, en el caso de las rocas metamórficas (Figura 7) (Catalini et al., 2017).

Dentro de la clasificación de Suelos de la Provincia de Córdoba, Argentina se encuentran dentro de los Entisoles. Los cuales se caracterizan por ser suelos jóvenes, superficiales, poco desarrollados, con un horizonte superficial “A” pobre en materia orgánica, estructura muy débil, textura gruesa y pedregosa, de rápida saturación ante la ocurrencia de precipitaciones (Barbeito et al., 2017).



*Figura 7: Izquierda Suelos residuales. Derecha Roca desnuda aflorante en cuenca alta. Fuente: relevamiento de campo realizado por INA-CIRSA.*

### 3.2.2. Piedemonte

Constituye el ambiente intermedio entre el dominio de Montaña y el de Planicie. Su origen se vincula a una antigua bajada aluvial conformada por la unión de numerosos conos aluviales que soporta una cubierta moderna de sedimentos de carácter eólico. El relieve dominante se caracteriza por la sucesión de interfluvios fuertemente ondulados y bajos amplio plano-cóncavos (Catalini et al., 2017).

Completan las geoformas cerros aislados de composición granítica y colinas discontinuas de material conglomerádico y las fajas fluviales sobreimpuestas de los cursos principales del sistema de drenaje aterrazadas en tres niveles principales por efecto de geotectónica y/o cambios climáticos: un nivel superior antiguo, un nivel medio y un nivel inferior reciente (Barbeito et al., 2017).

El material geológico principal se compone de depósitos fluviotorrenciales provenientes de conos aluviales y depósitos limo-arenosos por sectores con cubierta limo-loésica, relleno coluvio-aluviales en bajos plano-cóncavos y depósitos aluviales representados por gravas, arenas y limos. Los suelos dominantes son profundos (del orden de los 100 cm), bien drenados de texturas franco arenosa comprendidos dentro del orden de los molisoles, altamente erosionables en función de la topografía (Barbeito et al., 2017).

### 3.2.3. Ambiente de Planicie

El ambiente del Piedemonte en su parte de menor altitud pasa en forma gradual al ambiente de la Planicie de carácter fluvio eólico. El relieve es suavemente ondulado con alternancia de Interfluvios plano-convexos y amplios bajos plano-cóncavos.

Sobreimpuesto al relieve de planicie se presenta el extenso paleoabanico asociado al aporte detrítico histórico del río Guanuscate, con su inicio inmediatamente al este de la Ruta Nacional N° 9, en el que se incluyen vestigios de geoformas características disimuladas por la cubierta fluvio-eólica, destacándose por la clara definición geomorfológica los antiguos canales de abanico. Con origen en el ápice en el límite sur del paleoabanico, el más antiguo y de menor definición geomorfológica, y en el límite norte el más reciente y de mayor definición, ambos sin conexión hidrológica con el curso actual del río y activados solo por los aportes pluviales locales (Catalini et al., 2017).

Completa las geoformas un canal de abanico activo que tiene inicio en un nuevo ápice en formación a 8 km. al este del trazo de la Ruta Nacional N° 9, a margen derecha del cauce actual. Esta geoforma a diferencia de los paleocanales norte y sur, tiene conexión hidrológica por desborde del cauce en crecidas de magnitud (Barbeito et al., 2017).

Los materiales geológicos en la planicie fluvio-eólica se corresponden con depósitos loésicos con intercalaciones aluviales y en el paleoabanico con limo-loésicos, arenosos y arenas finas, con lentes de arenas gruesas y gravas. Los suelos en general mantienen las características de los interfluvios del piedemonte. Son profundos (100 cm.), bien drenados de texturas franco arenosa comprendidos dentro del grupo de los molisoles, altamente erosionables en función de las pendientes (Barbeito et al., 2017).

### 3.3. CLIMA

#### 3.3.1. Nivel Provincial

La diversidad geográfica de la Provincia de Córdoba y su extensión determina una amplitud de condiciones climáticas, además de la ubicación relativa de la misma respecto al Continente. En líneas generales, la Provincia tiene un clima templado, con diferenciaciones en cuanto a la disponibilidad de las lluvias y su distribución en el año. Las temperaturas al igual que las precipitaciones se reducen de Norte a Sur y de Este a Oeste (Figura 8), salvo en las faldas orientales de las sierras, que por influencia de los vientos del Este, y debido a la significativa humedad que transportan, las precipitaciones son más abundantes, siendo el régimen de hasta 1500 mm por año. Las temperaturas suelen fluctuar entre los 10 °C y los 30 °C, y las precipitaciones alcanzan en promedio los 800 mm anuales. Los valores térmicos del mes de enero (Figura 9), que representa las temperaturas de verano, se distribuyen en la Provincia de Córdoba en un rango que varía entre los 23,5 °C en el sur provincial hasta valores superiores a los 26,0 °C en el extremo Norte. Las temperaturas del mes de julio (Figura 10), que representan a la estación invernal, evidencian un rango de valores que van desde los 8 °C en el sur hasta los 11,5 °C en el norte. Las mayores amplitudes se registran en el Sur y Oeste del territorio. A pesar de tratarse de una provincia mediterránea, la temperatura no alcanza registros extremos y el rango o amplitud térmica anual no supera los 16 °C en todo el territorio (De La Casa & Ravelo, 2003).

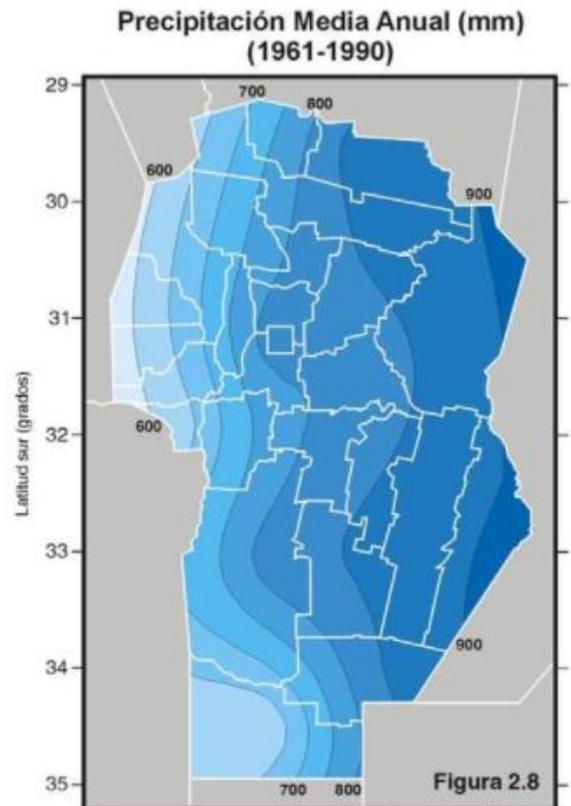


Figura 8: Precipitación media anual de la Provincia de Córdoba (mm) 1961-1990 (De La Casa & Ravelo, 2003).

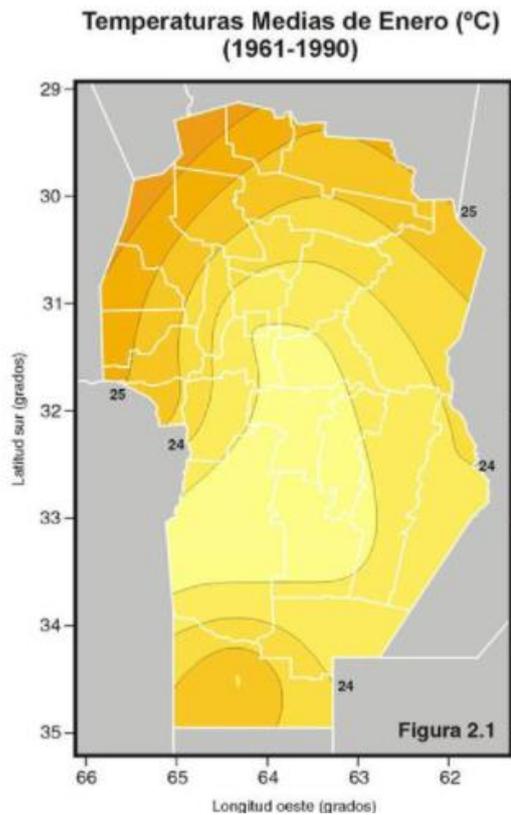


Figura 9: Temperaturas medias de Enero (C°) 1961-1990. (De La Casa & Ravelo, 2003).

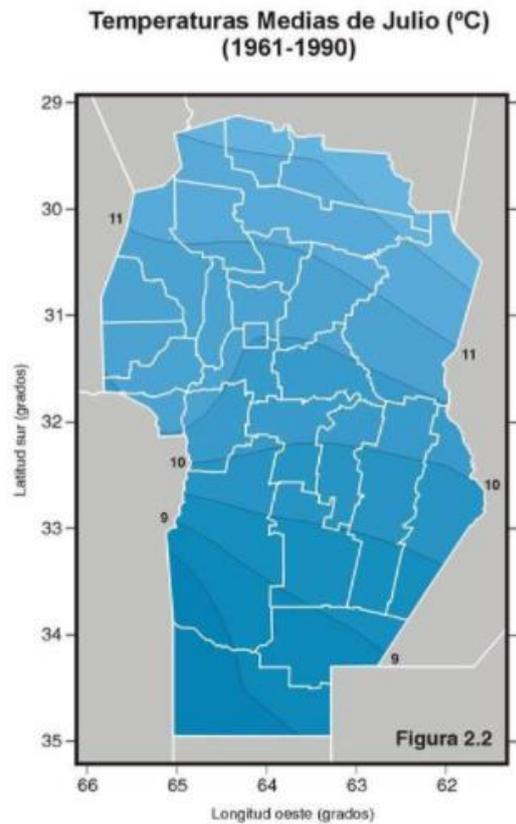


Figura 10: Temperaturas medias de Julio (C°) 1961-1990 (De La Casa & Ravelo, 2003).

### 3.3.2. Nivel de Cuenca

El clima de las Sierras Chicas es semiárido templado, con lluvias de régimen monzónico concentradas en el verano (Capitanelli et al., 2012). La precipitación anual promedio en los últimos 40 años es de 949 mm y la temperatura media de 18,9° C, con una máxima y una mínima absolutas de 40,1 y -6,6° C, respectivamente (Figura 11) (Gavier-pizarro & Período, 2004).

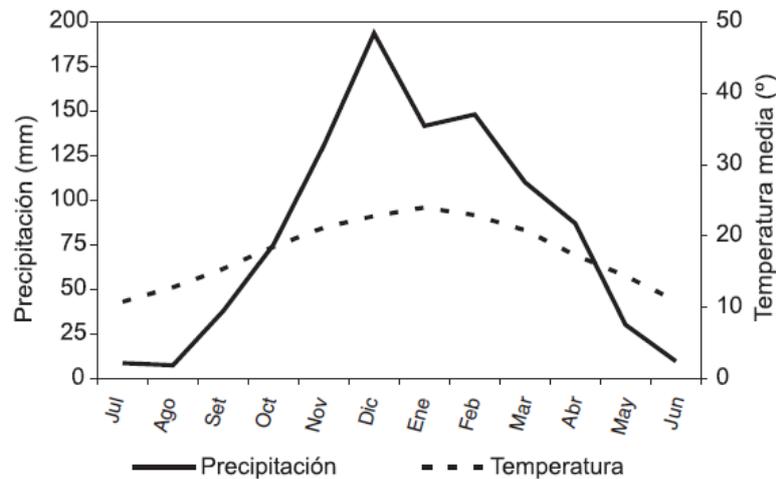


Figura 11: Temperatura y precipitación media mensual para la localidad de Río Ceballos en el período 1991-2000. Fuente: Cooperativa de vivienda, Provisión de Obras, Servicios públicos, Asistenciales y Otros Servicios Río Ceballos Limitada y la Fuerza Aérea Argentina.

### 3.4. VEGETACIÓN

La vegetación cumple un papel fundamental en el ciclo del agua en lo respectivo a la intercepción de las precipitaciones y regulación de la escorrentía e infiltración, lo que se relaciona con el control de la erosión hídrica y de las inundaciones. A nivel aéreo el follaje, frena el impacto directo de las gotas de lluvia permitiendo la distribución lenta del agua a través de hojas, tallos y troncos; y a nivel radicular además de fijar los suelos mediante el sistema radicular genera condiciones de mayor permeabilidad, facilitando la infiltración (Catalini et al., 2017).

El nivel de protección hidrológica que la vegetación brinda a los suelos depende de las condiciones fisonómicas-estructurales que la misma presenta. Es mayor en la vegetación arbórea, disminuyendo en las especies arbustivas y de matorrales, adoptando importancia al aumentar la densidad de cubierta con respecto al suelo (Barbeito et al., 2017).

#### 3.4.1. Nivel Provincia

Para explicar los distintos tipos de vegetación en la Provincia de Córdoba, se ha dividido la misma en distintos niveles o regiones fitogeográficas. La fitogeografía, o

geografía vegetal, es la "ciencia de la vegetación" que estudia la relación entre la vida vegetal y el medio terrestre, o en otras palabras se la define como: "la ciencia que estudia el hábitat de las plantas en la superficie terrestre". También estudia la distribución de los vegetales sobre la Tierra, analiza sus áreas de distribución y sus características, así como las causas que las condicionan y las leyes a las que responde. De acuerdo con el modelo clásico de la fitogeografía de Argentina desarrollado por Ángel L. Cabrera en el año 1953, la Provincia de Córdoba cuenta con tres regiones fitogeográficas (Mainardi, 2013) (Figura 12):

- **Región Pampeana**, al Sureste, constituida por estepas, predominantemente cubiertos con hierbas gramíneas como la cebadilla criolla, flechillas, pasto puna y cortaderas. Tradicionalmente ganadera, predominantemente agrícola en la actualidad.
- **Región del Espinal**, se extiende en Córdoba desde el Este, pasando por el Centro, hasta el Suroeste, en forma de bosques bajos, xerófilos, densos o abiertos, con un estrato arbóreo. Dominado por los algarrobos que son acompañados por talas, moradillos, espinillos y chañares. Zona agrícola, se encuentra extremadamente degradada, con pocas formaciones que recuerden su fisonomía original.
- **Región Chaqueña**, cubre parte del Centro, Norte, Noroeste y Oeste de la Provincia, incluyendo las estivaciones montañosas. Según la subregión se manifiestan el quebracho blanco, el horco-quebracho, el molle de beber, el coco, el tala, el espinillo, el molle, los algarrobos, entre otros. Si bien muy alterada. Es la que conserva mayor superficie de bosques nativos.



Figura 12: Regiones Fitogeográficas de la República Argentina. En color rojo se señala la ubicación de la Provincia de Córdoba. (Mainardi, 2013)

### 3.4.2. Nivel Cuenca

Las características fisonómico-estructurales de la vegetación están condicionadas por la latitud, altitud, exposición geográfica (R. Luti ,1970) y en gran parte, por la naturaleza del terreno y la morfología. Se distribuye en tres pisos o niveles: El Piso del Bosque Serrano en los niveles más bajos y hasta los 800 msnm, el Piso del Arbustal o Romerillal, desde los 800 a 1200 msnm en los niveles intermedios y el Piso de los Pastizales y Bosquecillos de Altura, en los niveles más elevados del sistema por encima de los 1500 msnm (Catalini et al., 2017).

El Piso del Bosque Serrano presenta las características del arbolado semidesértico xerófilo, que coexiste con pastizales, compuesto por elementos leñosos arbóreos bajos (menores a los 10 m), arbustivos de menor altura (menores a los 2 m) y pastizales medios y bajos duros. Los elementos arbóreos más representativos corresponden al molle (*Lithraea ternifolia*,) y el coco (*Fagara coco*), que coexisten con los elementos arbustivos (Barbeito et al., 2017).

Con aumento de la altitud el bosque es remplazado progresivamente por elementos arbustivos del piso del Arbustal, donde el elemento dominante es el romerillo (*Heterothalamus alienus*) que cambia gradualmente en los máximos niveles a elementos herbáceos del piso de los Pastizales y los Bosquecillos de altura, en donde los elementos herbáceos (*Stipa* y *Festuca*) alternan en escasos lugares al reparo con tabaquillos (*Polylepis australis*) (Catalini et al., 2017).

En el caso del piedemonte la cubierta de vegetación se representa por la mezcla de elementos arbóreos y arbustivos de la Vegetación de las Sierras y de El Espinal, en donde los elementos arbóreos representativos son el algarrobo blanco y negro (*Prosopis alba* y *nigra*), el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) y el tala (*Celtis tala*). Por su parte en el Ambiente de la Planicie la cubierta se representa con exclusividad por los elementos arbóreos de El Espinal (Barbeito et al., 2017).

A continuación (Figura 13), se muestran imágenes de las principales coberturas vegetales en la cuenca alta del río Guanusacate:



Bosque Serrano



Bosque de Llanura pedemontana



Bosque Exótico (dominado por *Ligustrum lucidum*)



Arbustal



Arbustal Mixto



Cultivos



Pastizal Degradado



Pastizales Naturales

Figura 13: Ejemplos representativos de los principales tipos de coberturas en la cuenca de estudio (Gavier-pizarro & Período, 2004).

### 3.5. FAUNA

Como consecuencia que los animales suelen ser muy susceptibles a las variaciones o perturbaciones que pueda sufrir su hábitat, su distribución espacial dependerá en gran medida de factores como la temperatura, la presencia o no de agua y la posibilidad de la existencia de relaciones de competencia con otras especies o la presencia de depredadores. De acuerdo con la vegetación existente en la cuenca la fauna variará de manera notable, ya que la misma condiciona los distintos tipos de hábitats y de esta manera la presencia o ausencia de una u otra especie (Manzano García & Martínez, 2017). Es por ello, que es posible hacer una distinción de la fauna entre:

- ✚ Bosque Serrano
- ✚ Arbustos y Pastizales en altura

#### **Bosque Serrano**

Ocupa la altura media y baja de las sierras y presenta la existencia de mamíferos como la comadreja, el zorro gris y de las pampas, el gato montés y el puma; Aves como la perdíz, paloma, martín pescador, cachalote o reina mora; y entre los reptiles encontramos la iguana overa y colorada, lagartos, culebra, yarará y cascabel.

#### **Arbustos y Pastizales de Altura**

Se caracteriza por contener la fauna de las laderas, donde se encuentran: pumas, zorrinos, picaflor, águila, gavián, cascabel, lagartos, ranas y sapos. En las Altas Cumbres predomina el puma, el zorro colorado, el cóndor, carpintero campestre, águila, serpientes y lagartos verdes.

### 3.6. ORGANISMOS ENCARGADOS DE LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

La legislación provincial de Córdoba crea en el año 2012 mediante Ley 10.115 la Dirección de Policía Ambiental de la Provincia de Córdoba, la cual depende del señor Ministerio de Servicios Públicos. Este órgano tiene como objetivo ejercer el control y fiscalización en materia hídrico-ambiental y de los recursos naturales en general, en todo el ámbito de la Provincia de Córdoba, cumpliendo y haciendo cumplir toda normativa que contenga previsiones referidas a la protección y cuidado del ambiente y de los recursos hídricos. Asimismo, tiene a su cargo el control efectivo de toda



actividad pública y/o privada que pueda afectar el equilibrio del ambiente, procurando el cese inmediato de toda forma de contaminación y/o alteración sobre el mismo y gestionando su inmediata remediación.

Las facultades de la Dirección de policía ambiental son las siguientes (LEY 10115 - CREACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE POLICÍA AMBIENTAL, 2012):

1. Proteger los recursos naturales tanto en suelos (aguas superficiales), subsuelos (aguas subterráneas), contaminación del aire, depredación de especies animales y vegetales y demás degradaciones y/o daños que puedan afectar negativamente al ambiente en el territorio de la provincia.
2. Entender en la determinación de objetivos y formulación de políticas ambientales, específicamente en lo referente a la fiscalización y control de las actividades que puedan generar cualquier clase de alteración en las condiciones del ambiente.
3. Aplicar los planes y políticas de fiscalización y control que determine conjuntamente con las Secretarías de Recursos Hídricos y Coordinación y de Ambiente de la Provincia o los organismos que en el futuro las reemplacen.
4. Ejercer el control efectivo y permanente de las actividades que puedan generar cualquier clase de riesgo para el ambiente, con amplias facultades de fiscalización e investigación, pudiendo realizar toma de muestras, monitoreos periódicos, inspecciones, elaboración de informes técnicos, patrullajes, control de vertido de efluentes y cualquier otra medida y/o acción que juzgue conveniente a los fines de lograr los objetivos mencionados anteriormente.
5. Labrar y sustanciar los sumarios y procesos administrativos pertinentes ante la detección de incumplimientos a la normativa vigente que sean de su competencia, actividad no declarada o cualquier otra actividad que cause daño al ambiente o que se realice sin contar con la debida autorización de la Autoridad de Aplicación.
6. Organizar el cuerpo de inspectores creando las patrullas especializadas de inspección que se consideren necesarias, de acuerdo con las características de la diversidad ambiental y territorial de la provincia.

7. Establecer su organización interna creando las áreas que la compongan a los fines de efficientizar su funcionamiento.
8. Aplicar las sanciones que juzgue necesarias, previa elaboración del sumario administrativo enunciado en el inciso nº4 del presente artículo y de acuerdo con los parámetros que fije la reglamentación.
9. Imponer obligaciones de remediación en el caso de detectar la afectación de recursos naturales en la provincia.
10. Disponer de las medidas necesarias para hacer cesar la actividad contaminante o no autorizada de manera inmediata.
11. Requerir el auxilio del Poder Judicial cuando esto sea necesario a los fines de hacer cesar los efectos perniciosos para el ambiente, provocados por las actividades ilícitas detectadas.
12. Ordenar la clausura de los establecimientos, emprendimientos, obras y/o actividades -comerciales o no- que sean perniciosas para el ambiente.
13. Ordenar el cese inmediato de toda actividad que se esté desarrollando sin la debida autorización y/o en infracción a la normativa que sea de su competencia, procediendo al precintado y/o secuestro y/o incautación de toda maquinaria y/o medio de transporte y/o todo otro elemento utilizado para cometer y/o facilitar la comisión de la infracción
14. Disponer procedimientos de control en todos los cursos y espejos de agua y en los territorios naturales de la provincia, a fin de detectar tempranamente actividades contaminantes y/o perniciosas para el ambiente
15. Perseguir y sancionar la actividad de caza y pesca ilegal, comercialización de especies animales y vegetales nativas y toda otra actividad que afecte la biodiversidad y conservación de las especies de la Provincia de Córdoba
16. Suscribir los convenios necesarios con los distintos estamentos estatales, tales como municipalidades, comunas, estado nacional, policía provincial, policía federal, otras reparticiones de la provincia, organizaciones no gubernamentales, empresas privadas y demás organizaciones, con el objetivo de agilizar y/o facilitar el cumplimiento de los fines que la Dirección de Policía Ambiental tiene asignados en la presente Ley



17. Suscribir convenios con laboratorios públicos o privados, universidades y/o cualquier otro organismo a los fines de realizar los estudios técnicos necesarios para determinar la existencia de incumplimientos a la normativa vigente
18. Colaborar con las Secretarías de Recursos Hídricos y Coordinación y de Ambiente de la Provincia, o con los organismos que en el futuro las reemplacen, a fin de implementar políticas de concientización sobre el cuidado del ambiente, los recursos hídricos y los recursos naturales en general
19. Recibir e investigar las denuncias que realicen personas físicas y/o jurídicas, organizaciones intermedias y distintas entidades públicas y/o privadas que puedan detectar la supuesta comisión de ilícitos y/o infracciones que sean de competencia de la Dirección de Policía Ambiental
20. Propender a la capacitación permanente de sus agentes y empleados, manteniendo a los mismos con el mayor grado de actualización técnica en el objeto de su competencia
21. Entender en todas las facultades que se le confieran por leyes específicas relacionadas con su finalidad general y competencias.

### 3.7. ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS

Dentro de la cuenca de estudio el único espacio natural que se encuentra protegido es la Reserva natural de la defensa Ascochinga; la cual posee 3.389 ha y está ubicada en el faldeo este y norte del cordón de las sierras Chicas (Coordenada central: a 30°58'4.08"S 64°17'27.24"O) al noroeste de la Provincia de Córdoba en la pedanía San Vicente del departamento Colón y dentro del municipio de La Granja. Está administrada en conjunto por la Fuerza Aérea Argentina y por la Administración de Parques Nacionales.

En el año 2015 se pretendió ejecutar por parte de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba el dique Carapé para dar solución al problema de las reiteradas inundaciones en la zona, pero el proyecto no fue aprobado en audiencia pública, y quedó descartado.



*Figura 14: Ubicación de la Reserva natural de la defensa Ascochinga. En color rojo se indica la ubicación tentativa del Dique Carapé (no ejecutado), Fuente: Sala de prensa ambiental.*

La reserva natural, creada el 9 de diciembre de 2014, pertenece a la ecorregión del bosque chaqueño serrano y dada la escasez de agua de la región, ayuda a la regulación hídrica y la protección frente a la erosión de las cabeceras de la cuenca del río Guanusacate (Jesús María).

La posibilidad de que los territorios asignados a las Fuerzas Armadas Argentinas pudieran tener paralelamente una función en el cuidado del patrimonio biológico ha sido un deseo de la comunidad conservacionista de ese país durante décadas. Gestiones de varias ONG permitieron acercar posiciones y el 14 de mayo de 2007 se firmó el Convenio Marco de Cooperación entre el Ministerio de Defensa y la Administración de Parques Nacionales, por el cual se crearon las reservas naturales de la defensa. Este acuerdo permitió declarar Espacio de Interés para la Conservación de la Biodiversidad a los territorios de las fuerzas armadas que poseen interés conservacionista, espacios naturales que pasan a ser administrados de forma conjunta por ambas jurisdicciones; el cual constituyó un gran paso para la protección de los escasos bosques nativos remantes en la Provincia de Córdoba.

### 3.8. ESTADO FORESTAL

La intensa y cada vez más rápida pérdida de bosques nativos que se registra a escala mundial constituye uno de los problemas ambientales más críticos a comienzos del



siglo XXI (R. Repetto, Kio, 1988); Mientras que en los países desarrollados la superficie ocupada por bosques se ha estabilizado, o aún en algunos casos se está incrementando (Ferrara et al., 2019), en los países subdesarrollados, como es el caso de Argentina, las masas forestales están declinando rápidamente, particularmente en los trópicos (R. Repetto, Kio, 1988). La pérdida alcanza tasas anuales del 0,6% en África, 0,9% en Asia y 0,7% en Sudamérica, debido sobre todo la expansión de la agricultura (Stiling ,1996).

La extracción excesiva de bosques afecta directamente y a veces en forma severa a la calidad de vida del hombre. Sus efectos negativos incluyen la pérdida de recursos forestales, paisajísticos, alimentarios y genéticos, compuestos de uso medicinal, etc., así como la desaparición de la rica biodiversidad asociada a los bosques (Wilson ,1989; Hunter 1996). La deforestación produce además cambios en el ambiente físico (erosión y pérdida de suelo), alteraciones en el clima local, regional y global, en los ciclos de nutrientes y en los regímenes hidrológicos (Gavier-pizarro & Período, 2004).

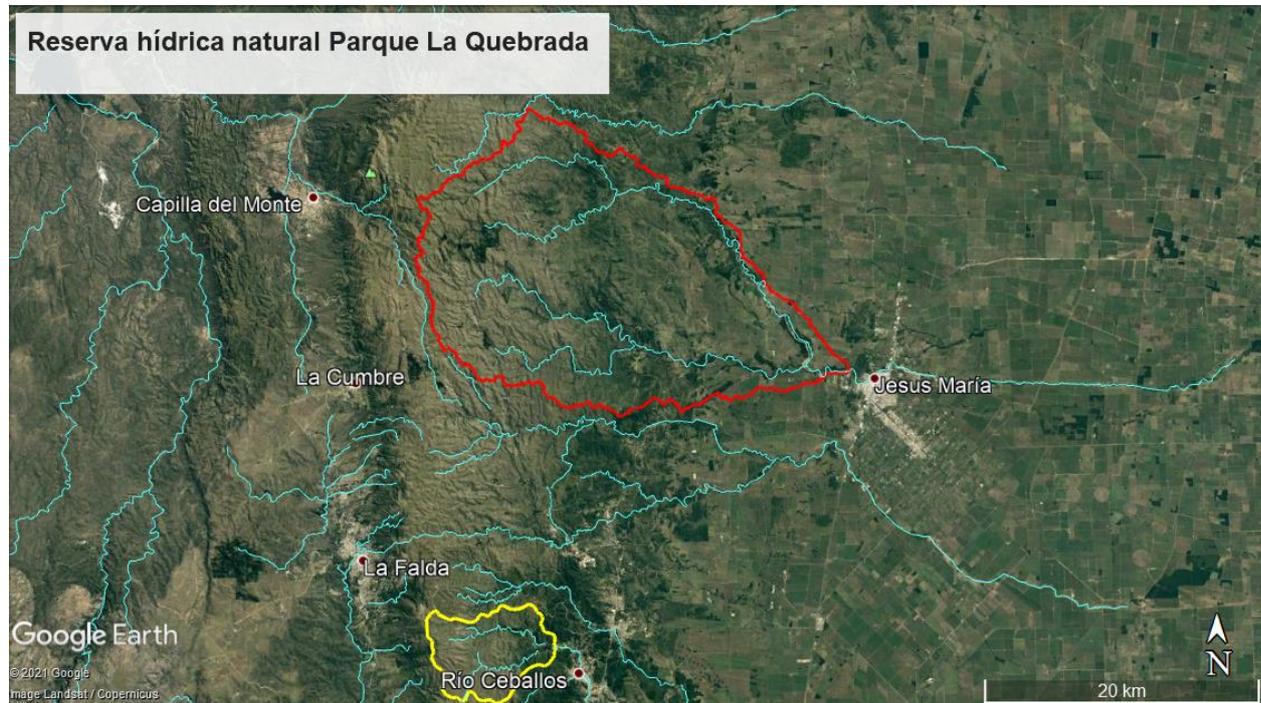
La deforestación no sólo implica la eliminación total de las masas boscosas sino también su fragmentación, proceso por el cual un área continua de bosque resulta fraccionada en áreas menores aisladas entre sí por terrenos con otro tipo de cobertura (por ejemplo, vegetación arbustiva, cultivos, áreas urbanas, etc.). La fragmentación constituye una de las mayores amenazas para la biodiversidad en todo el mundo (Takiya, 2000). Las áreas de bosque remanente pierden algunas de las características propias del bosque no fragmentado, principalmente debido a que por un lado se altera su microclima, y por el otro se produce la extinción de especies vegetales y animales que requieren grandes extensiones de bosque continuo (Saunders et al. 1991). Como resultado, se alteran los patrones sucesionales y la composición biótica de las comunidades animales y vegetales. En muchos casos se favorece la invasión de especies exóticas (Farina & Fuller, 2017).

La expansión de las fronteras agrícolas y de las ciudades son las actividades humanas más relacionadas a la deforestación y la fragmentación (Hunter ,1996). La expansión agrícola ha sido el factor más crítico desde comienzos del siglo XX, mientras que la

expansión urbana se incrementó hacia fines de esa centuria en forma radical. Las proyecciones de crecimiento poblacional sugieren que esta tendencia se agudizará (Gavier-pizarro & Período, 2004).

En Argentina la pérdida de bosques ha alcanzado cifras alarmantes, principalmente en las selvas subtropicales y el Chaco. Entre 1990 y 2000 se talaron 2.851.000 ha de bosques (el 7,6% del total existente en 1990) a una tasa del 0,8% anual. Esta tasa de deforestación es una de las más elevadas registradas en Sudamérica (FAO ,2001). En la provincia de Córdoba la deforestación ha llegado a valores similares, particularmente en el bosque chaqueño del norte de la provincia y el bosque serrano de Córdoba, donde se sitúa el área de estudio (L. E. Hoyos et al., 2013).

La situación de conservación del bosque serrano de Córdoba ha sido calificada como “vulnerable” en estudio de evaluación del estado de conservación de las ecorregiones terrestres de Latinoamérica y el Caribe (Dinnerstein et al. 1995). Lamentablemente, dentro del área cubierta por el bosque serrano de las Sierras Chicas existen muy pocas áreas protegidas. La más importante, además de la Reserva Natural Ascochinga, es la Reserva Hídrica Natural La Quebrada con una extensión de 4200 ha, creada en 1987 con el fin prioritario de proteger la cuenca hídrica del dique de La Quebrada y su vegetación (Ley 6964/83, Áreas Naturales Provinciales y sus Ambientes Silvestres. Córdoba, Argentina. Decreto 5620). Lamentablemente no existe información disponible sobre si la situación de área protegida se ha visto reflejada en una mejor conservación de sus bosques. La misma está ubicada en el departamento Colón de la provincia de Córdoba (Argentina), en las cercanías de la localidad de Río Ceballos, aproximadamente a 40 kilómetros de la ciudad de Córdoba, al sur de la cuenca de estudio como se puede observar en la Figura 15.



*Figura 15: Ubicación de la Reserva hídrica natural Parque la Quebrada (en color Amarillo) con respecto a la ubicación de la cuenca de estudio (en color rojo).*

### 3.8.1. PRINCIPALES ESPECIES DE ÁRBOLES

Las principales especies forestales que se encuentran en la cuenca alta río Guanacate son las que se muestran a continuación (Tabla 1), las cuales se describen en detalle en el apartado 6.6.2. Definición de especies a implementar.

Nº	Nombre	Género y Especie
1	Molle	Lithraea ternifolia
2	Coco	Fagara coco
3	Algarrobo blanco	Prosopis alba
4	Algarrobo negro	Prosopis nigra
5	Quebracho blanco	Aspidosperma quebracho blanco
6	Tala	Celtis tala
7	Espinillo	Vachellia caven
8	Chañar	Geoffroea decorticans
9	Garabato	Acacia praecox

Tabla 1: Principales especies de árboles en la cuenca de estudio.

### 3.8.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 1- COCO

El *Zanthoxylum coco* es un árbol siempreverde de la familia Rutaceae, natural de Argentina y de Bolivia donde crece en bosques mayormente colinosos y espiníferos. Su hábitat natural son las sierras pampeanas y subandinas.

#### Características de interés para repoblación:

- Es una especie orófila<sup>3</sup>, hasta 1400 msnm, aunque se la suele encontrar a mayores altitudes.
- Tiene una buena capacidad de regeneración post-incendio. Esta cualidad representa una gran virtud dado a que la cuenca de estudio tiene una incidencia elevada de incendios forestales.
- Posee una copa globosa y densa de follaje abundante y siempre verde que permite una buena protección a la erosión hídrica a lo largo de todo el año.

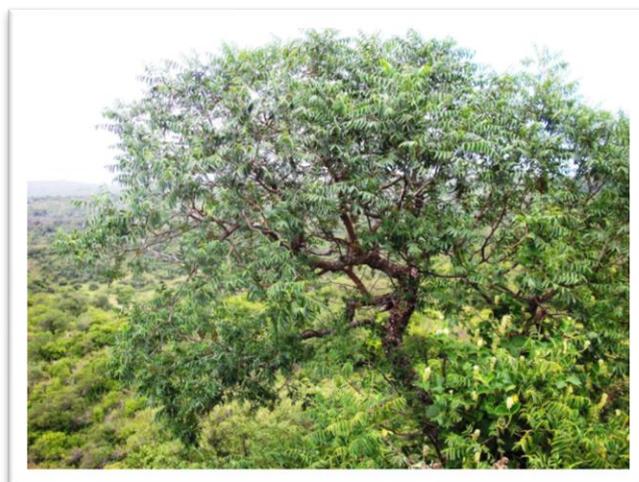


Figura 16: Coco (*Zanthoxylum coco*).

<sup>3</sup> Tipo de vegetación adaptada a bajas temperaturas y común en ambientes de montaña de gran altitud.



## 2- MOLLE

*Lithraea molleoides* es una especie arbórea de 2,5 a 9 m de altura, perteneciente a la familia de las anacardiáceas. Es nativa de Sudamérica, en zonas de Argentina, Bolivia, vegetación del Cerrado de Brasil, y en todo el territorio de Uruguay.



Figura 17: Molle (*Lithraea molleoides*).

### **Características de interés para replacación:**

- Especie orófila, adaptada a bajas temperaturas y común en ambientes de montaña de gran altitud la cual contribuye a la protección de las cabeceras de cuenca evitando la erosión y facilitando la captación de las lluvias en las nacientes de los ríos.
- En invernadero los plantines alcanzan aproximadamente 20 cm en un año. La supervivencia es alta y son muy resistentes a la herbivoría.
- Lo habitual es que se las halle entre los 800 y 1.000 msnm

### 3- ALGARROBO BLANCO

*Prosopis alba* es un árbol medio, de 9 a 12 metros en altura y puede desarrollar un tronco de hasta 1 metro de diámetro, aunque raramente se encuentren árboles tan crecidos debido a las talas. El tronco es corto y la copa es globulosa, hasta de 10 m de diámetro. Las ramas son delgadas y se extienden frecuentemente hasta el suelo.



Figura 18: Algarrobo Blanco (*Prosopis alba*).

El ritidoma (corteza) es fino, pardo grisáceo, y de madera veteadada.

#### **Características de interés para repoblación:**

- Este árbol está perfectamente adaptado a la sequía (xeromorfo), sales y arena; o sea, que es extremadamente eficiente en el aprovechamiento del agua, produce la mayoría de los frutos en años de sequía, y ha sido exitosamente introducido en regiones áridas.
- A los algarrobos blancos se los encuentra en zonas de 500 a 1200 mm de precipitaciones, con temperaturas que van desde los 48 °C de máxima absoluta, hasta los -10 °C de mínima absoluta, donde las lluvias se producen en la época estival. Temperaturas y precipitaciones similares a las que se encuentran en la cuenca (La precipitación anual promedio es de 949 mm y la temperatura media es de 18,9° C, con una máxima y una mínima absolutas de 40,1 y -6,6° C).
- Es una especie que requiere sol directo para su desarrollo, aumentando su crecimiento al aumentar la exposición a la luz solar.
- Tienen la capacidad de fijar Nitrógeno Atmosférico (N<sub>2</sub>), debido a la relación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium*.
- No tolera muy bien las heladas.



- Son especies caducifolias. La caída de las hojas se produce en invierno, cuando ocurren heladas, o en su defecto cuando comienza la nueva brotación.

#### 4- ALGARROBO NEGRO

*Prosopis nigra*, llamado comúnmente algarrobo negro, es un árbol leguminoso de Sudamérica que habita la ecorregión del Gran Chaco (en particular, la zona de transición entre el Chaco Húmedo y el Chaco del Sudeste), en Argentina, Bolivia, Paraguay y Uruguay.

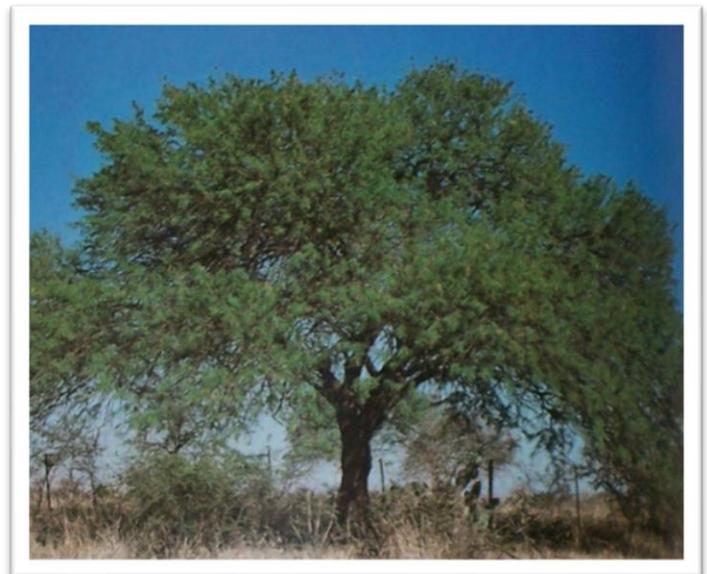


Figura 19: Algarrobo Negro (*Prosopis nigra*).

#### Características de interés para repoblación:

- Similares a las del algarrobo blanco.
- Tolera climas áridos, pero también puede sobrevivir en terreno inundado durante mucho tiempo.

#### 5- QUEBRACHO BLANCO

De porte esbelto, corteza rugosa, gruesa y resquebrajada, sus hojas son alargadas en forma de lanza y terminan en espinas. Madera pesada, textura fina y homogénea, debido a esto es muy utilizado para producir carbón o vigas para la construcción de cabañas, lo que constituye una gran amenaza por la tala desmedida a tal fin. Sus flores son pequeñas de color amarillo claro. Sus



Figura 20: Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*).

frutos son cápsulas leñosas de color verde claro tornando a un color amarillento cuando maduran.

Es un árbol de crecimiento lento y es uno de los ejemplares que se encuentra en cierto peligro de desaparición en la provincia de Córdoba.

**Características de interés para repoblación:**

- Es una especie que requiere de mecanismos de facilitación para instalarse.
- En estado de plántula se caracteriza por poseer una relación raíz-tallo elevada y mayor velocidad de crecimiento radical comparado con el tallo.
- El mismo crece hasta altitudes máximas de los 500 msnm.

**6- TALA**

Es un árbol espinoso que puede alcanzar los 12 metros de altura. Su madera es densa. Se lo encuentra en zonas con suficiente humedad y en forma de arbusto en aquellos terrenos más secos. Florece en primavera, sus flores son de color amarillenta o verdosas.



*Figura 21: Tala (Celtis tala).*

Su fuste es a menudo torcido, con la corteza agrietada, escamosa, color castaño ferruginoso cuando es adulto o, lisa, delgada y grisácea cuando es joven; ramas principales tortuosas, ramas jóvenes en zig zag, con espinas geminadas. Se lo encuentra formando bosquecillos (Talares) a menudo a la vera de arroyos, ríos y aguadas.

**Características de interés para repoblación:**

- Es un árbol que prospera en cualquier terreno, aunque prospera mejor en suelos sueltos, bien drenados y con disponibilidad de agua y buena luminosidad.
- Existen registros de esta especie hasta en altitudes de 2600 msnm.

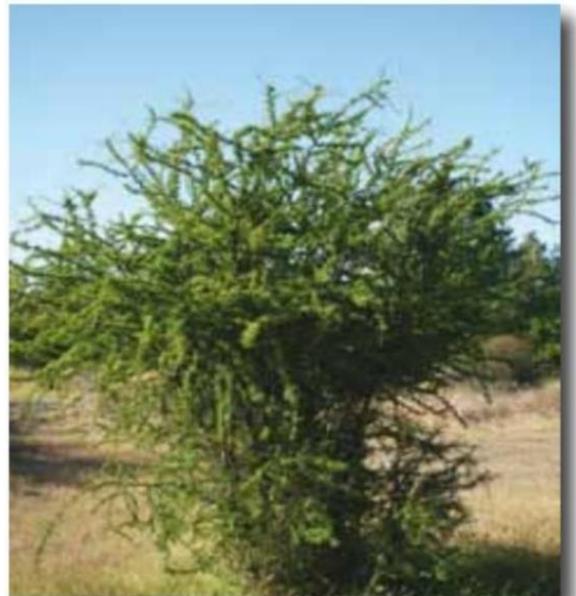


## 7- ESPINILLO

El Espinillo (*Vachellia caven*) es un árbol serrano típico de las sierras de Córdoba, resistente a las sequías y cuánto más adversas son las condiciones físicas del lugar, mejor es su crecimiento y es más abundante.

Sus hojas son pequeñas y sus espinas largas; su tronco es estrecho y leñoso, y su corteza es de color pardo oscuro. Sus flores son pequeñas y de color amarilla.

Puede medir hasta 7 m de altura con diámetros de fuste de hasta 50 cm o comportarse como un arbusto ramificado desde su base. Florece a principios de primavera y fructifica en verano y otoño.



*Figura 22: Espinillo de hábito arbóreo (izquierda) y espinillo de hábito arbustivo (derecha).*

### **Características de interés para repoblación:**

- Es un árbol resistente a la falta de agua, adaptado a periodos de sequías prolongados o con muy escasa precipitación, así como también en terrenos con

gran índice de erosión en donde su crecimiento es más lento y no alcanza grandes tamaños.

- El espinillo es un árbol de follaje caduco, muy espinoso, de corteza rugosa y color castaño oscuro.
- Es una especie muy plástica ya que se adapta a varias condiciones ambientales, en especial a climas secos y terrenos poco fértiles o con poca profundidad de suelo.
- De acuerdo con la distribución espacial, se inserta principalmente en el clima de tipo mediterráneo, el que se caracteriza por la concentración de lluvias en unos determinados meses del año, un prolongado período de sequía y temperaturas extremas moderadas.
- Con respecto a la altitud, generalmente prefiere pendientes suaves, aunque normalmente es posible encontrarlo desde el nivel del mar hasta los 1800 msnm, aunque es más frecuente encontrarlo en altitudes intermedias entre los 400 – 700 msnm.

## 8- CHAÑAR

El chañar también llamado sofaique (*Geoffroea decorticans*) es un árbol de la familia de las fabáceas (o leguminosas) de corteza verde amarillenta, y con un fruto comestible. Su madera es densa, la cuál es útil en carpintería y también como carbón y leña. Tiene un fuste recto, cuando crece aislado, pero es arbustivo (estructura ramificada) cuando crece en bosquecillos. Tiene una altura entre los 3 y 10 m con un tronco que puede superar los 40 cm de diámetro y cuenta con un follaje caducifolio abundante y de color verdoso.

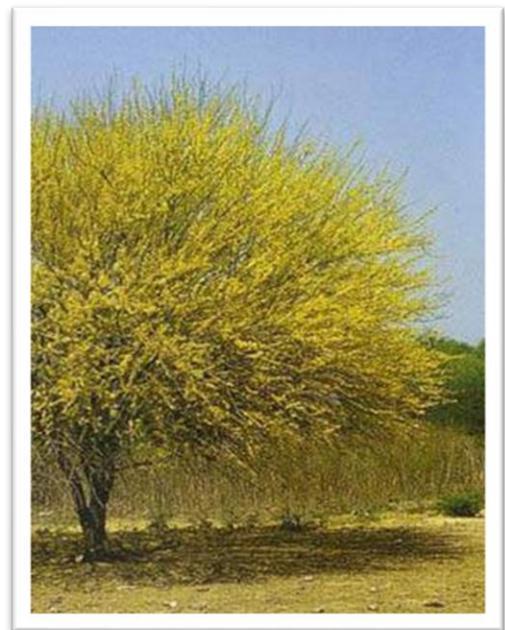


Figura 23: Chañar (*Geoffroea decorticans*)

**Características de interés para repoblación:**



- Es ideal para repoblar monte quemado, porque tiene raíces gemíferas, es decir que además de expandirse por semilla, como todos los otros árboles, también lo hace por las mismas raíces, por lo cual un ejemplar puede con el tiempo crear montes espesos, llamados chañarales.
- Usualmente se encuentra entre los 500 y 1.500 msnm., pero existen registros del mismo hasta los 2.470 msnm.
- Esta especie se adaptada a suelos altamente salinos, pero, se establece en diversas clases de suelos naturalmente, además, tiene tolerancia marcada por suelos “salitrosos” donde predominan los sulfatos y cloruros (Martínez ,1989).

## 9- GARABATO

El garabato (*Acacia praecox*) crece en zonas de clima subtropical, en Argentina, Bolivia, Paraguay y Uruguay. Se lo puede encontrar en forma de arbusto o de árbol con altura de hasta 9 m de alto y 25 cm de diámetro. Presenta una copa irregular cuando es joven, alta y estrecha al cuando crece, además presenta púas curvas en las ramas y en las hojas. Sus flores son amarillas y se agrupan en espigas.

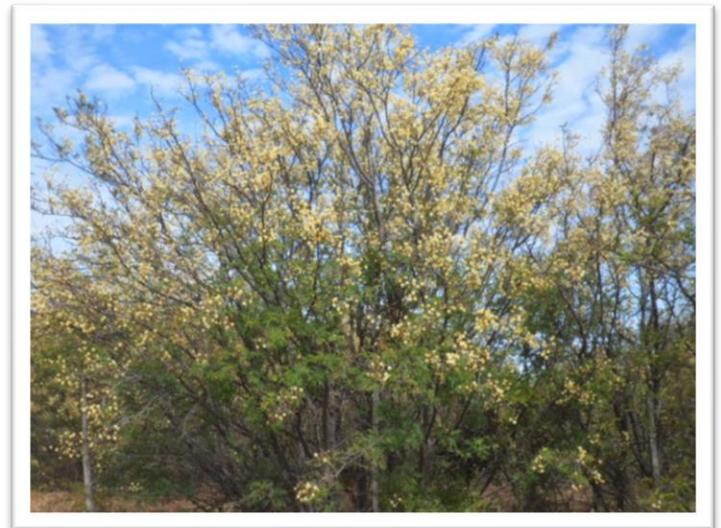


Figura 24: Garabato (*Acacia praecox*)

### **Características de interés para repoblación:**

- Es resistente a las sequías y heladas.
- Es una especie muy sencilla de sembrar y mantener, resistente a cualquier tipo de ambiente, siendo tolerantes a climas templados, así como a climas fríos, su naturaleza no requiere de una tierra totalmente fértil para su desarrollo.
- La presencia de esta especie es mayor en aquellos bosques que han sido muy alterados por el hombre, comportándose en esos casos como planta invasora debido a su crecimiento rápido.

- Se lo encuentra hasta en altitudes máximas de 1000 msnm.

### 3.8.2. INCENDIOS FORESTALES

Tanto la interpretación del rol ecológico del fuego en los ecosistemas como su estudio y gestión del riesgo de incendios requiere del conocimiento de los patrones espaciales de ocurrencia del fuego, y para ello es esencial la existencia y disponibilidad de registros de incendios espacialmente explícitos (Klinger, 2020). Por medio del análisis del patrón espacial del fuego se pueden identificar zonas más y menos propensas a incendiarse, estudiar sus causas y utilizar ese conocimiento para gestionar adecuadamente el fuego a nivel de ecosistema. Además, los mapas de área quemada permiten analizar la magnitud de un evento, estimar las emisiones de gases invernadero (French et al., 2002; Lehsten et al., 2009; Oliveras et al., 2014) y evaluar las medidas necesarias para la rehabilitación del área incendiada (Zhu et al., 2006).

En un estudio (Argañaraz, 2016) sobre la dinámica espacial del fuego realizado en una porción de las Sierras Pampeanas de Argentina, ubicadas en la Provincia de Córdoba (Figura 25), se analizaron cuatro sistemas serranos: Sierras del Norte, Sierras Chicas (donde se encuentra la cuenca de estudio), Sierras Grandes y Cumbres de Gaspar. Del cual, resultaron las sierras chicas el sistema serrano más afectado por los incendios, al considerar que tuvieron el mayor número total de incendios, de mayor magnitud por unidad de área, mayor frecuencia y un 25 % de superficie efectivamente quemada.

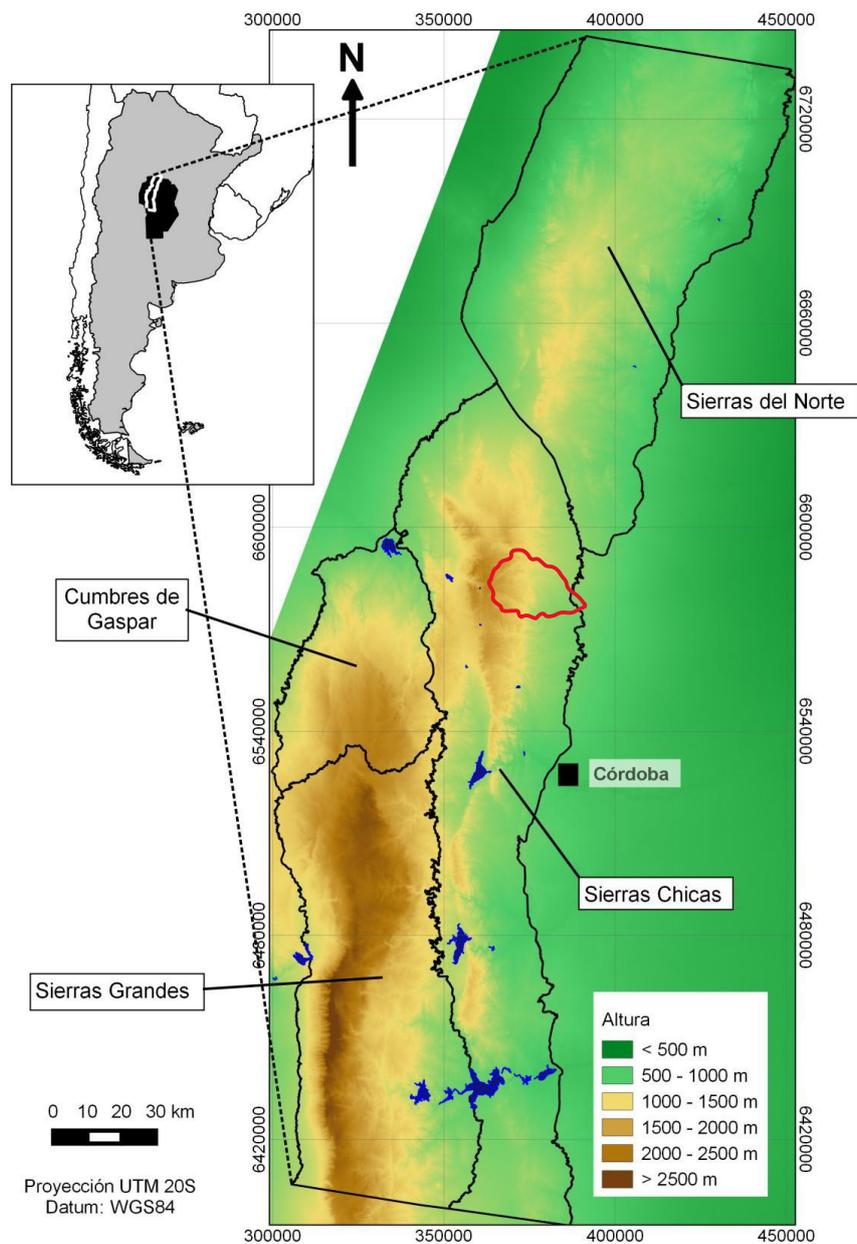


Figura 25: Porción de las Sierras Pampeanas de Argentina ubicadas en la Provincia de Córdoba. En color rojo se indica la cuenca de estudio. Fuente: Tesis Doctoral titulada: *Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba*, autor: Juan Argañaraz.

La explicación de porque las Sierras Chicas fue el sistema serrano más afectado en donde las densidades de incendios fueron mayores, se puede explicar debido a que es la región con mayor precipitación (lo que implica mayor carga de combustible);

además es donde se encuentra la mayor densidad poblacional y actividad turística ,por ende donde se llevan a cabo las mayores fuentes de ignición (Argañaraz, 2016).

Por otro lado, las Sierras Chicas están sufriendo un proceso de expansión de la interfaz urbano-rural y es en este tipo de ambientes donde la ocurrencia de incendios suele ser mayor, ya que las igniciones de origen antrópico son más frecuentes (constituyen la principal razón de inicio de incendios en un 90-95%) y encuentran suficiente combustible para propagarse (Platt, 2012).

De acuerdo con el estudio realizado por Argañaraz la ocurrencia de incendios fue diferente en los cuatro sistemas serranos estudiados. Las Cumbres de Gaspar y las Sierras Chicas fueron las más afectadas en términos de superficie relativa, ya que el área quemada entre 1999 y 2011 fue equivalente al 35 % y 31 % del área total, respectivamente (Figura 26, Tabla 2). El área quemada efectiva en estos sistemas serranos fue de 31 % en las Cumbres de Gaspar y de 25 % en las Sierras Chicas; indicando una mayor frecuencia de incendios en estas últimas, ya que más del 5 % de su superficie fue afectada por frecuencias de incendio mayores a 1 (Tabla 3), mientras que en las Cumbres de Gaspar esta fue del 4 %(Argañaraz, 2016).

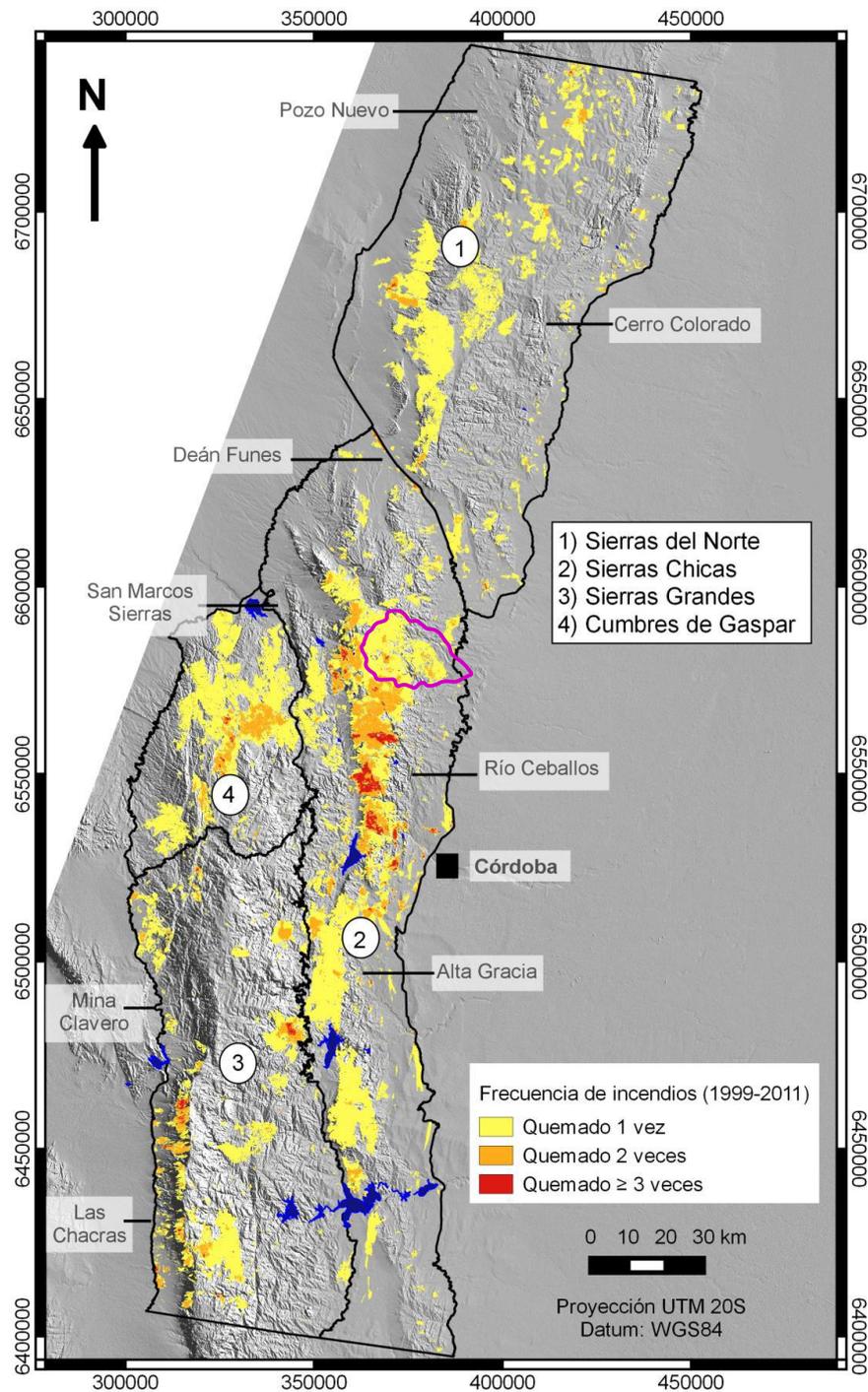


Figura 26: Áreas quemadas y frecuencia de incendios del periodo 1999-2011 en las Sierras de Córdoba, Argentina. En color magenta se indica la cuenca de estudio. Fuente: Tesis Doctoral titulada *Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba*, autor: Juan Argañaraz.

	Área total [ha]	Área quemada total [ha]	%	Nº incendios/ 1000km <sup>2</sup>	Área quemada efectiva [ha]	%
Sierras Chicas	812.663	253.801	31,2	113	201.136	24,8
Sierras Grandes	584.668	96.323	16,5	93	72.685	12,4
Sierras del Norte	785.306	116.245	14,8	55	108.480	13,8
Cumbres de Gaspar	243.460	85.031	34,9	51	74.557	30,6
Total	2.425.944	548.441	22,6	312	456.834	18,8

*Tabla 2: Número de incendios, área quemada total y efectiva en las Sierras de Córdoba durante el periodo 1999 - 2011. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz.*

Frecuencia de incendios	Sierras Chicas		Sierras Grandes		Sierras del Norte		Cumbres de Gaspar		Sierras de Córdoba	
	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%	Área [ha]	%
0	611527	75,2	511983	87,6	676826	86,2	168903	69,4	1969110	81,2
1	158555	19,5	60003	10,3	101871	13,0	64400	26,5	384807	15,9
2	35299	4,3	11087	1,9	6439	0,8	9840	4,0	62663	2,6
3	6962	0,9	1561	0,3	169	0,0	317	0,1	9010	0,4
4	298	0,0	34	0,0	1	0,0	0	0,0	334	0,0
5	21	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	21	0,0

%. El porcentaje indica la proporción del área total de cada sistema serrano.

*Tabla 3: Área quemada efectiva para cada frecuencia de incendios del periodo 1999 –2011 en las Sierras de Córdoba. Fuente: Tesis Doctoral titulada Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba, autor: Juan Argañaraz.*

Luego de analizar la Figura 26, se apreció que casi el 100% de la superficie de la cuenca alta del río Guanuscate se ha quemado al menos una vez entre los años 1999 y 2011, siendo la zona alta de la cuenca la más afectada de todos los sistemas serranos, donde existen sectores que se han quemado más de 2 veces para el período que se hace mención.

Por otro lado, el estudio realizado en la tesis doctoral comprobó que la mayoría de las igniciones comenzaron en superficies cubiertas de pastizales y arbustales. Esto explica porque en la parte más alta de la cuenca entre los 1200-1700 msnm (ver plano



nº 12, del documento 2. Planos), cubierta por pastizales, se produjeron los mayores números de igniciones, con una superficie quemada efectiva entre 1999 y 2011 del 24 % del área total de todos los sistemas serranos (Tabla 4). Además los incendios afectaron en gran medida los bosques serranos, ya que la superficie incendiada de los mismos alcanzó un 18% del área total estudiada para el mismo período mencionado (Tabla 4) (Argañaraz, 2016).

Cubierta de suelo	Sierras Chicas	Sierras Grandes	Sierras del Norte	Cumbres de Gaspar	Total Sierras
Cultural	8,6	5,8	11,6	5,3	9,8
Bosque	26,3	12,5	9,8	25,9	17,8
Arbustal	26,8	10,2	19,6	44,0	25,0
Pastizal	42,4	13,8	21,4	22,9	24,0
Otros	8,6	6,7	12,9	9,8	7,1
Sin clasificar	-	20,8	9,8	-	11,6

Tabla 4: Proporción (%) de cada cubierta de suelo quemada entre 1999 y 2011 en cuatro sistemas serranos de la Provincia de Córdoba. Los porcentajes se calcularon a partir del área quemada efectiva. Fuente: Tesis Doctoral titulada *Dinámica espacial del fuego en las sierras de Córdoba*, autor: Juan Argañaraz.

### 3.8.3. RED VIARIA Y BARRERAS CORTAFUEGO

Las vías de acceso a las áreas forestales constituyen un elemento imprescindible para el control y extinción de incendios puesto que están estrechamente relacionadas con los elementos que sirven de barrera y así evitar su expansión. Su utilización en la defensa contra incendios tiene varias finalidades, tanto en prevención como en extinción:

- Sirven para la aproximación a los focos de incendio de los medios de extinción terrestres como vehículos autobomba y cuadrillas de bomberos.
- Para la vigilancia y control móvil con motocicletas o vehículos de pequeño a mediano porte (cuadriciclos o vehículos todo terreno).
- Como vías de escape y evacuación en caso de incendio.

Es por lo antes mencionado que es fundamental que exista una red viaria forestal que sea completamente funcional y que cumpla con buenas prácticas de transitabilidad y circulación, que posibilite realizar los trabajos cotidianos de mantenimiento de la masa forestal y en caso de emergencias, cuando se produzca un incendio.

Como se observa en la Figura 27 los caminos de acceso, en la cuenca de estudio, son escasos; especialmente en la parte alta de la cuenca, que como se explicó en el apartado 3.8.2. Incendios Forestales, es la más afectada por los reiterados incendios.

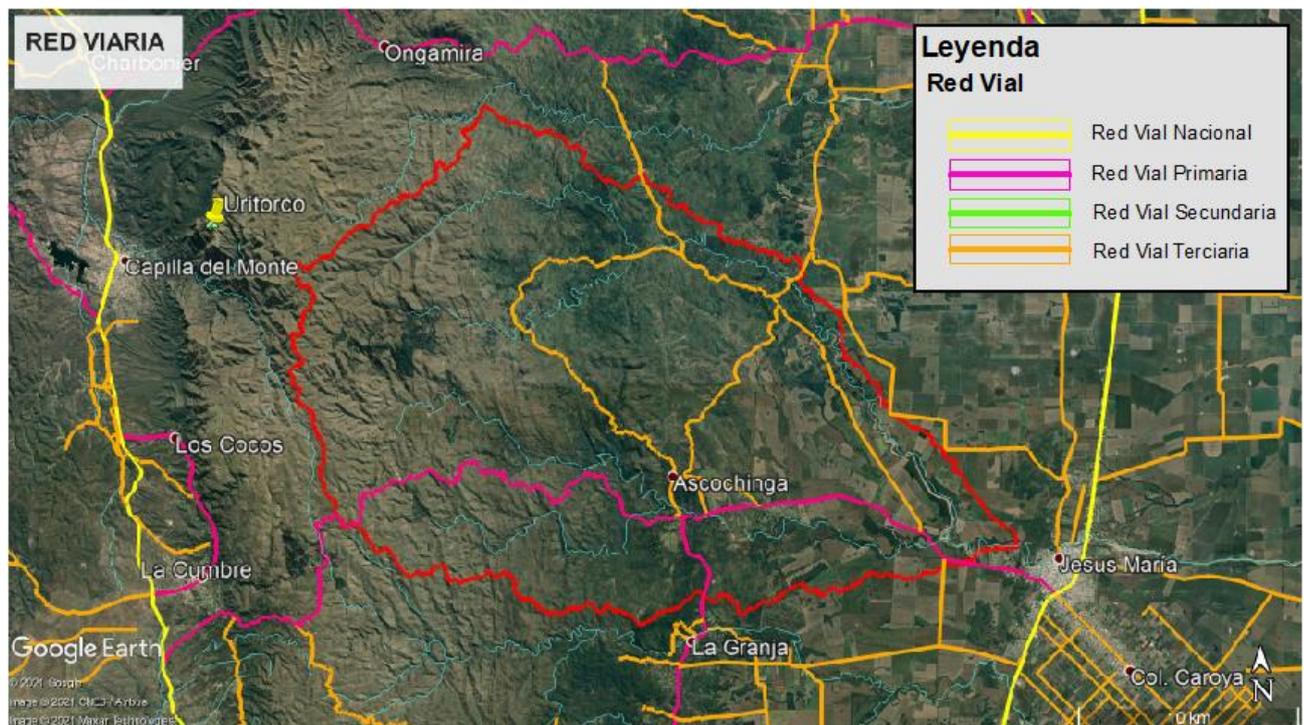


Figura 27: Red Viaria de la cuenca alta del río Guanusacate.

#### 3.8.4. ACTUACIONES SOBRE LA MASA FORESTAL EXISTENTE

Se desconoce que se hayan llevado trabajos de mejora, conservación y protección de las masas forestales existentes dentro de la cuenca de estudio. Si bien como se comentó en el apartado 3.7. se creó la Reserva natural de la defensa Ascochinga en el año 2015, no se tienen datos en la actualidad de que en la misma se hayan efectuado los trabajos antes mencionados.



### 3.9. ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

Gracias a la creciente disponibilidad de información generada por sensores remotos (fotografías aéreas e imágenes satelitales) y el avance alcanzado en tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es posible en la actualidad analizar con gran detalle la distribución de la vegetación y sus cambios temporales aún en extensas regiones (Gavier-pizarro & Período, 2004).

Se realizó un análisis de los cambios de uso del suelo mediante imágenes satelitales de la cuenca alta del Río Guanusacate desde el año 1986 (año en donde se comenzó a obtener información más precisa en la zona de estudio) hasta la actualidad, descartando las imágenes de menor resolución o con elevada nubosidad que no permiten hacer una adecuada interpretación. Para ello, se ha utilizado la herramienta de historial de imágenes que proporciona el Software Google Earth Pro, donde los resultados se muestran a continuación:

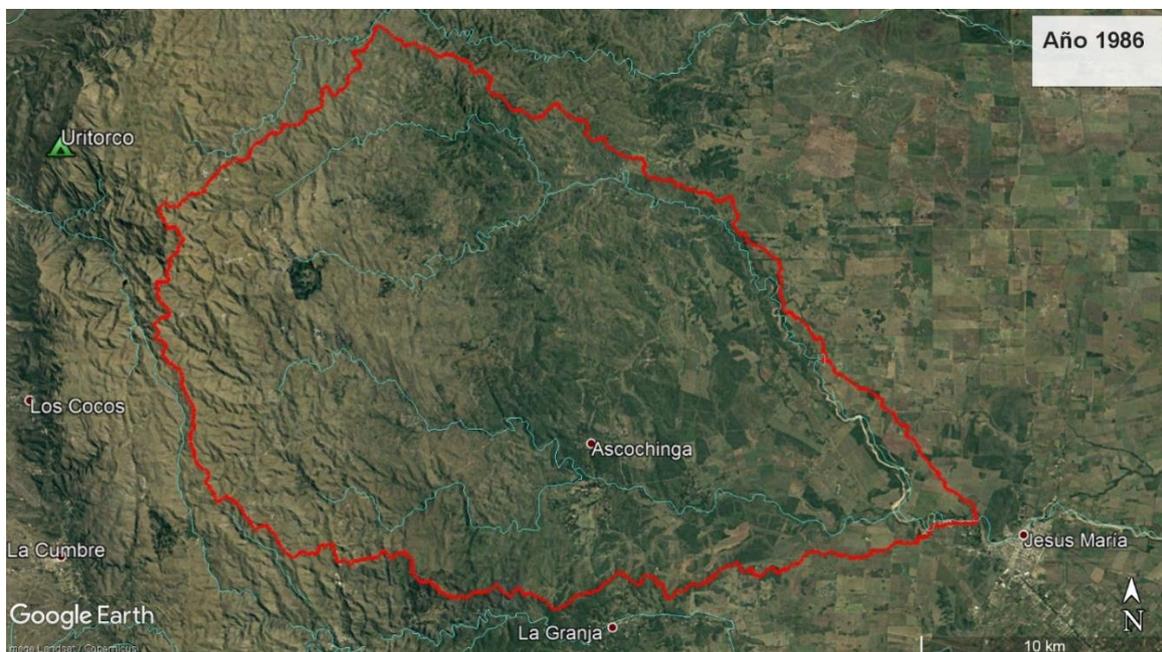


Figura 28: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1986. Fuente: Elaboración propia.

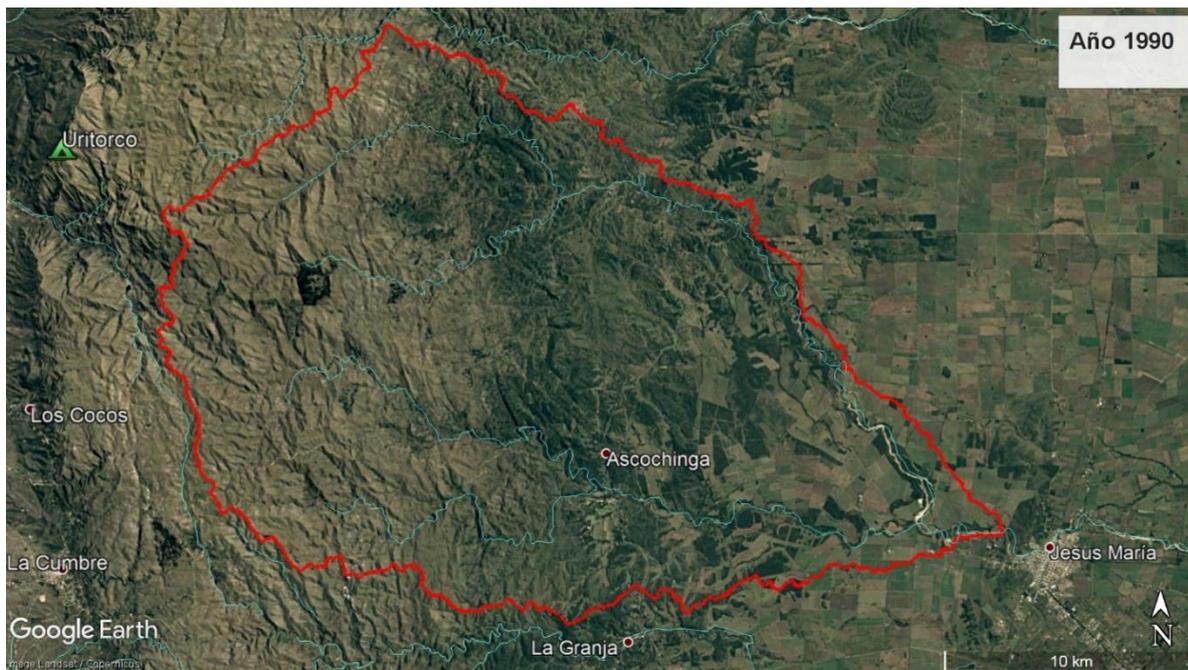


Figura 29: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1990. Fuente: Elaboración propia.

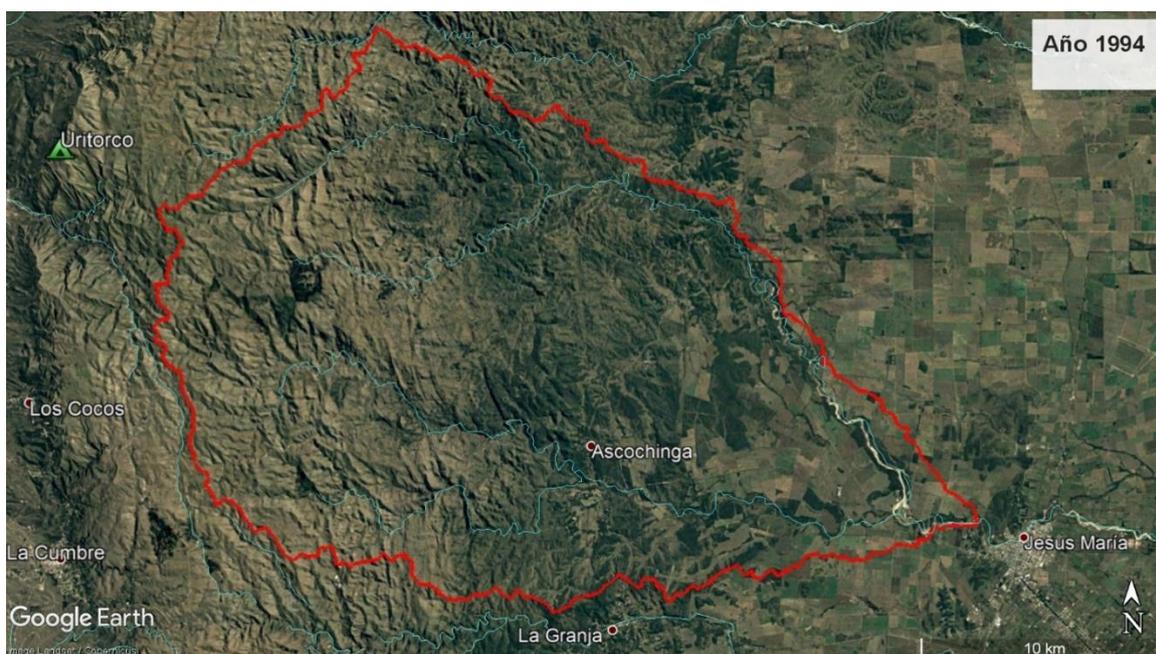


Figura 30: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1994. Fuente: Elaboración propia.

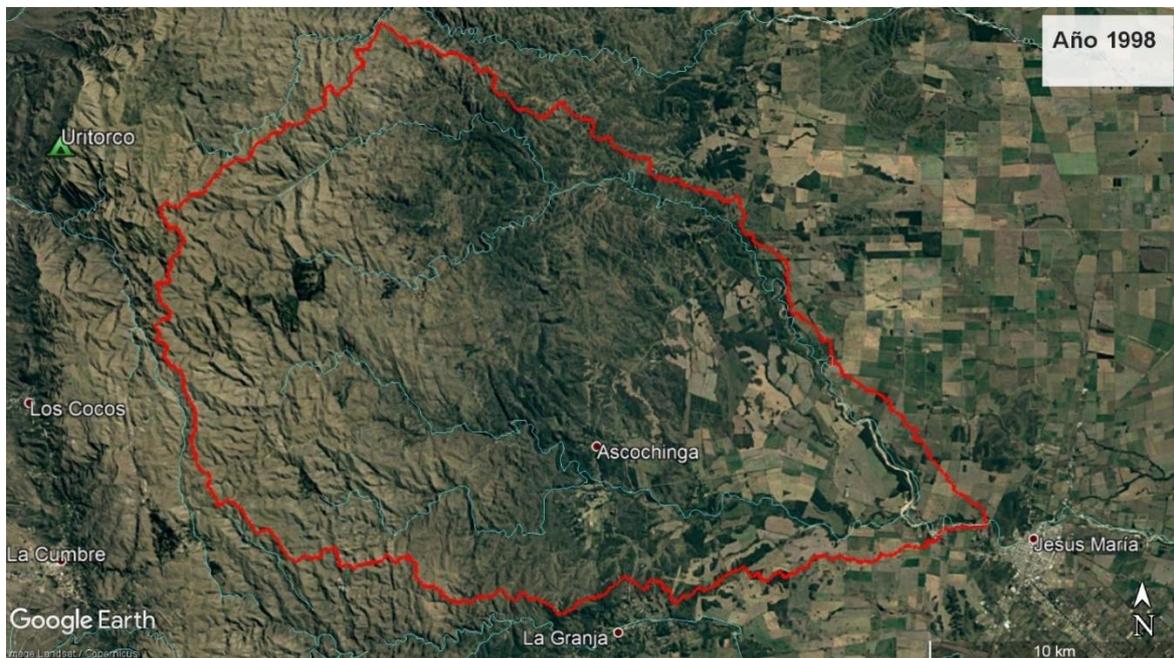


Figura 31: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 1998.

Fuente: Elaboración propia.

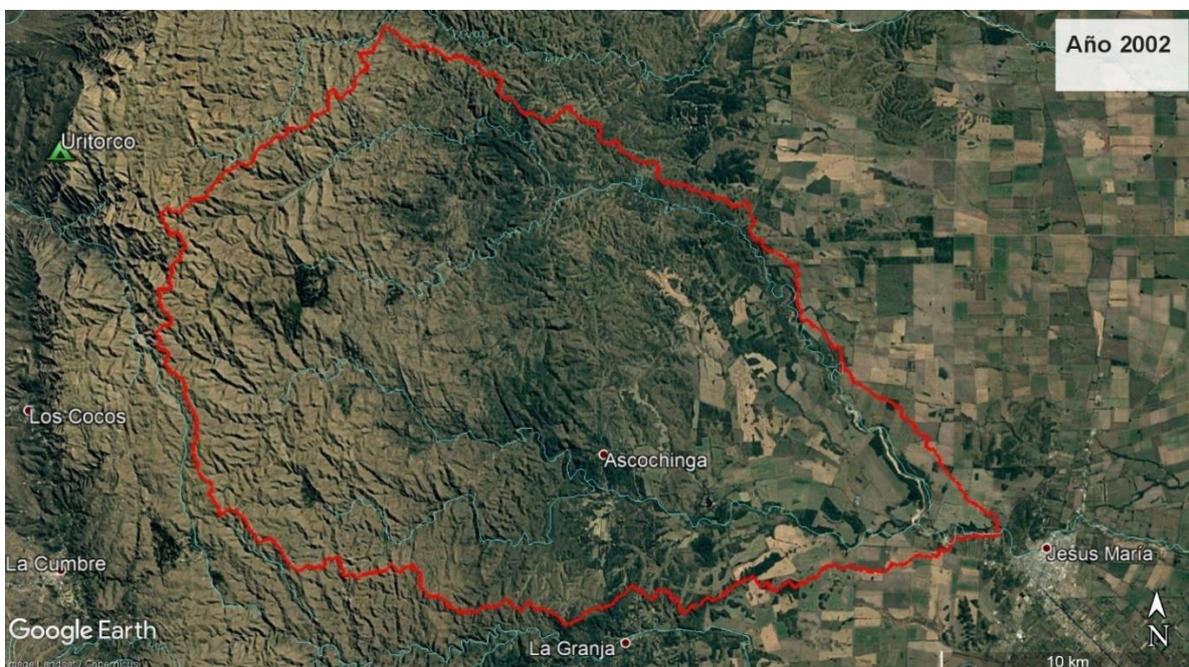


Figura 32: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2002.

Fuente: Elaboración propia.

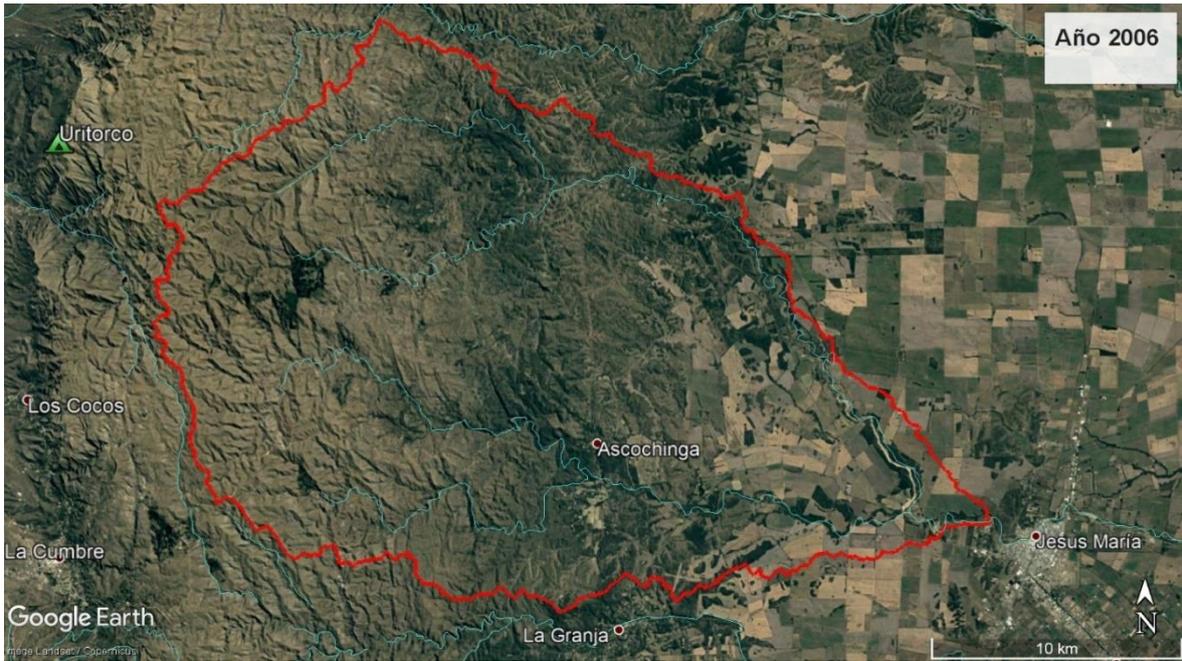


Figura 33: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2006.  
Fuente: Elaboración propia.

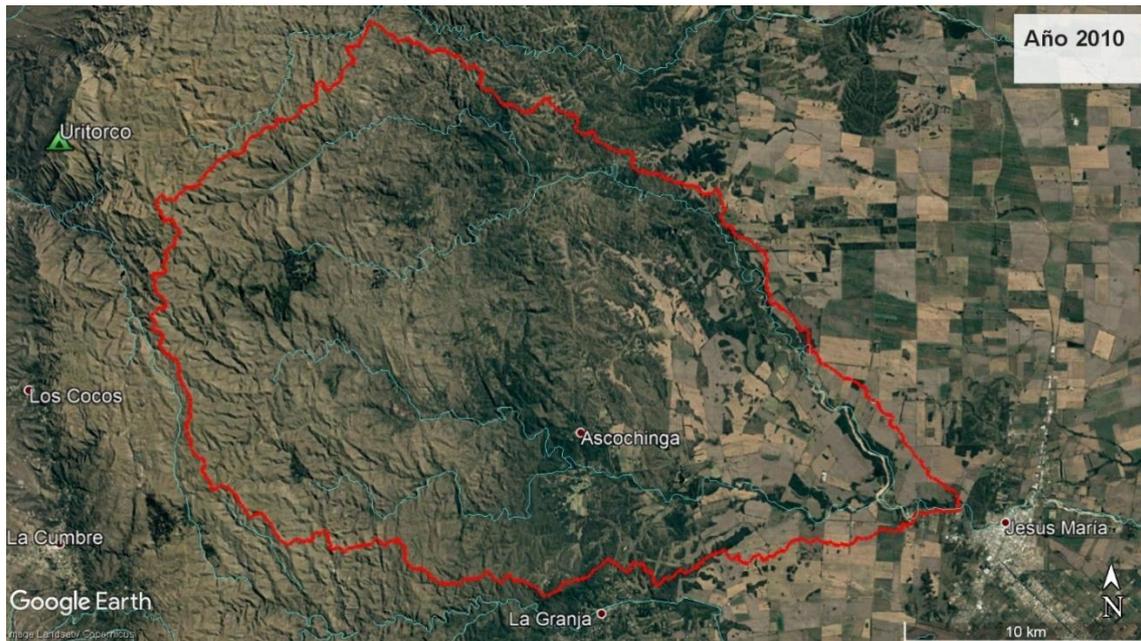


Figura 34: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2010.  
Fuente: Elaboración propia.

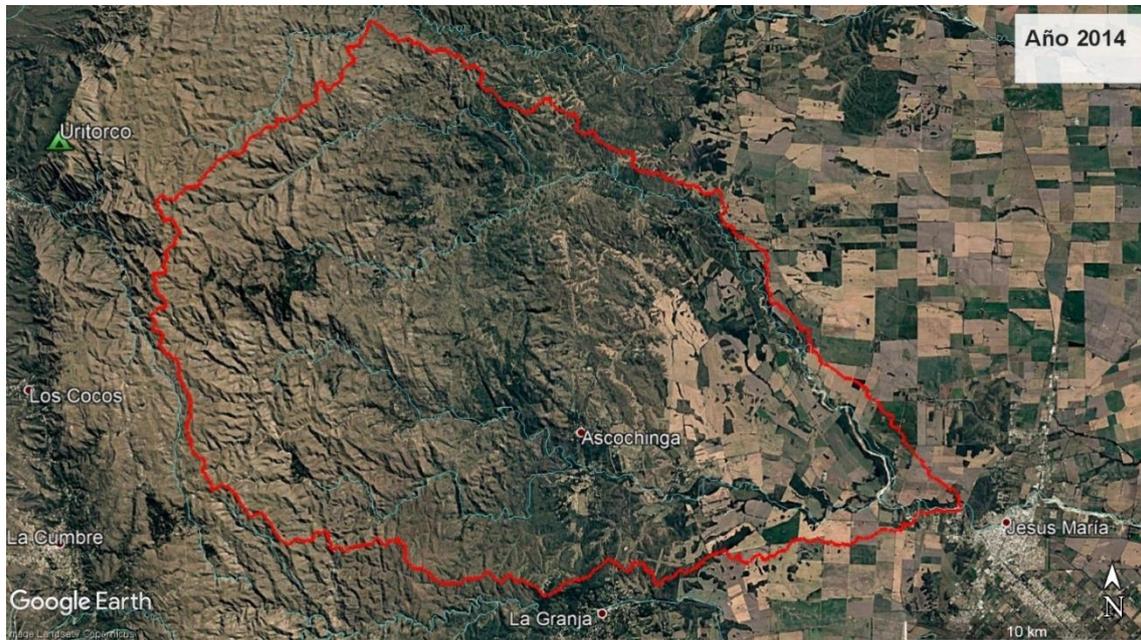


Figura 35: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2014.

Fuente: Elaboración propia.

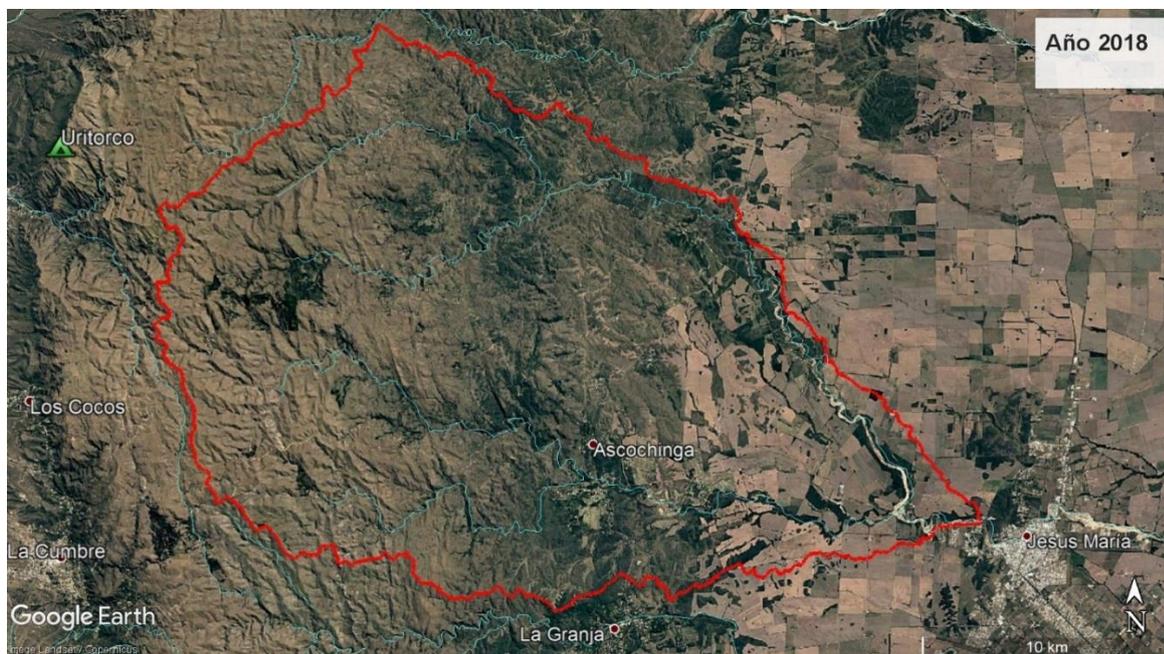
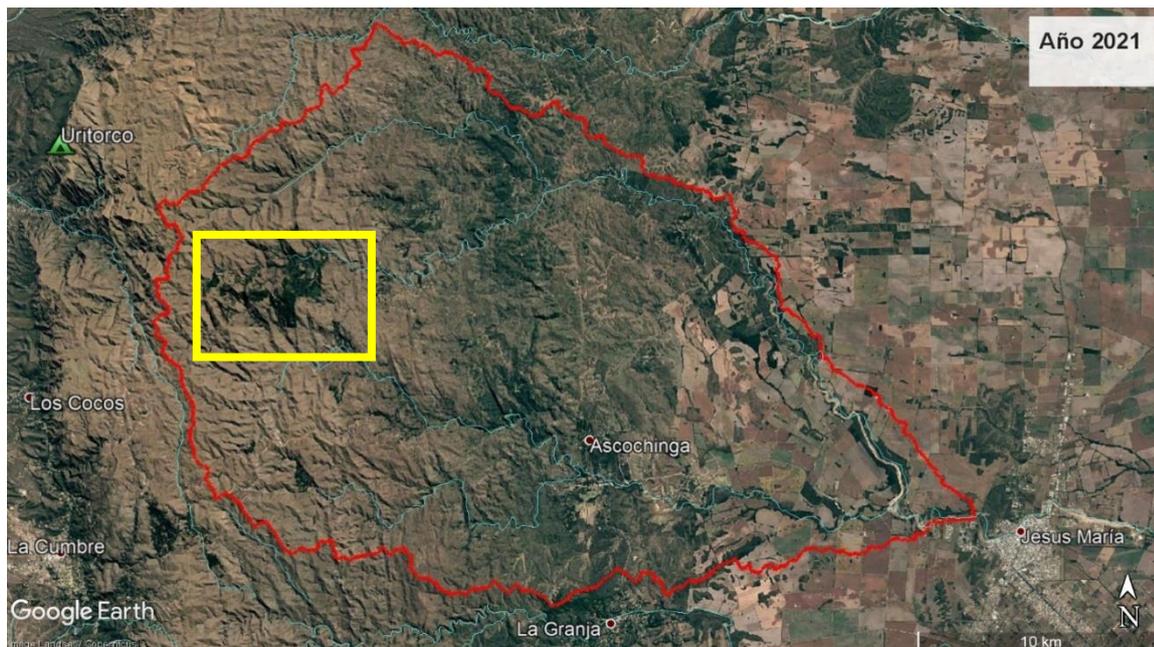


Figura 36: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanusacate en el año 2018.

Fuente: Elaboración propia.



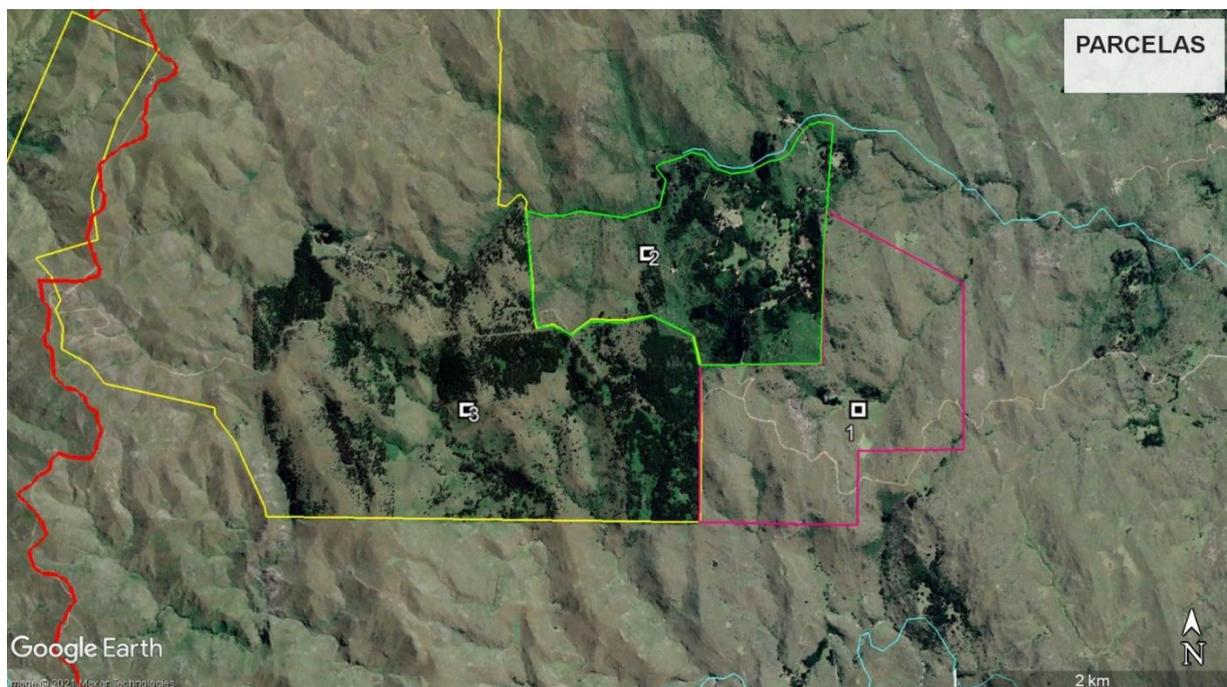
*Figura 37: Imagen satelital de la cuenca alta del río Guanúsacate en el año 2021.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Luego de haber observado detalladamente las figuras comprendidas entre la Figura 28 y Figura 37, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Entre los años 1986 y la actualidad la parte baja de la zona de estudio fue la que experimentó mayores cambios de uso de suelo (de Forestal a agrícola)
- La parte alta de la cuenca de estudio no presenta grandes modificaciones en el uso del suelo, esto quiere decir que los cambios fueron anteriores al año 1986. En esta parte de la cuenca se evidencia un proceso de desertificación avanzado, que la naturaleza no fue capaz de revertir.
- En la parte media de la cuenca, donde se concentra la mayor superficie de bosque serrano, se observa que a medida que avanzan los años (desde el año 1986 a la actualidad) el hombre fue avanzando sobre el monte en forma de ramales cada vez extensos.
- Por otro lado, se puede apreciar en la parte baja de la cuenca y puntualmente sobre los cursos de agua (próximo a la salida de la misma) que a medida que avanzan los años, aumenta la superficie de sedimentos. Esto demuestra cómo año tras año la erosión hídrica se intensifica al disminuir la cobertura vegetal, que es la encargada de brindar protección al suelo frente a la erosión.

- Después de hacer un análisis más detallado de la cuenca, se observó que en la parte alta (entre los 1400-1650 msnm) se encontraba un sector de bosque (ver recuadro de color amarillo en Figura 37) de elevada densidad que presentaba una geometría demasiado perfecta para ser natural. Es por ello, que se recurrió a la base de datos de Catastro On-line de la Provincia de Córdoba para comprobar si dicha geometría del bosque tenía alguna una explicación. Se pudo comprobar que la forma del bosque coincidía con los límites de 3 parcelas (Ver Figura 38); esto último, demuestra por un lado que las condiciones ambientales son las adecuadas para el crecimiento de especies arbóreas en la cabecera de la cuenca y por otro lado, permite comprobar que el aprovechamiento no sustentable de los recursos forestales durante décadas, ha producido la desprotección del suelo y con ello, desencadenado procesos erosivos severos.



*Figura 38: Bosque ubicado en la parte alta de la cuenca de estudio donde se diferencian tres parcelas que permitirían explicar la geometría no natural del mismo.*

### 3.10. SÍNTESIS DE LA HISTORIA DEL CAMBIO DEL USO DEL SUELO EN LAS SIERRAS CHICAS

La actividad humana en el área puede dividirse en tres períodos: a) Prehispánico, anterior a la ocupación europea, b) Colonial, a partir de la llegada de los conquistadores hasta fines del siglo XIX, y c) Moderno, desde comienzos del siglo XX hasta la actualidad (Gavier-pizarro & Período, 2004).

#### 3.10.1. PERÍODO PREHISPÁNICO

Los sanavirones eran el grupo indígena dominante a la llegada de los primeros colonizadores. En todas las sierras chicas se encuentran restos de sus establecimientos (Maldonado ,1994). Los sanavirones dependían de la agricultura, la cría de llamas y la caza. En los asentamientos más significativos se dedicaban al cultivo de maíz con regadío. También utilizaban la madera del bosque para leña, utensilios y construcciones. Dada la baja densidad poblacional y la limitada tecnología utilizada, su impacto sobre el bosque fue imperceptible (Page 1985).

#### 3.10.2. PERÍODO COLONIAL

A partir de la fundación de Córdoba el área de estudio fue distribuida en mercedes, usualmente otorgadas a los capitanes de las primeras expediciones fundadoras. Estas mercedes eran de gran tamaño. Con el tiempo las mercedes se fueron subdividiendo y en muchos casos dieron origen a nuevas propiedades o estancias a partir de las cuales se desarrollaron las poblaciones más importantes del área. La estancia de San Isidro dio origen a Río Ceballos y la de Salsipuedes a la localidad del mismo nombre (Gavier-pizarro & Período, 2004).

Hacia el año 1600 la actividad principal en estas estancias era la ganadería, y fundamentalmente la cría de mulas. En el siglo XVIII comienza a cobrar auge la cría de vacunos, y en menor escala ovejas y cabras. En los valles interserranos se cultivaban frutales, vides, trigo, maíz, tabaco, hortalizas y legumbres, y se sembraba alfalfa para la invernada del ganado. Había algunas canteras (por ejemplo, las que se ubicaban entre Río Ceballos y Unquillo), de las cuales se extraían cal y piedra para la construcción. Hasta el siglo XIX el área estaba escasamente poblada (Gavier-pizarro & Período, 2004).



### 3.10.3. PERÍODO MODERNO

A fines del siglo XIX se incrementó en forma notable la intervención del hombre en la en el área de estudio. Numerosas familias dedicadas a la cría de vacas, cabras y producción de cultivos se asentaron en los alrededores de los centros urbanos dando origen a nuevos barrios y poblados (Page 1985). Se regaban numerosas chacras y huertas en áreas de poca pendiente alrededor de Salsipuedes para cultivar alfalfares, huertos y frutales (Maldonado 1994). Muchos valles interserranos fueron desmontados para desarrollar cultivos (trigo, alfalfa, maíz y frutales) y algunos se dedicaron posteriormente a la cría de ganado (Gavier-pizarro & Período, 2004).

Durante este período también comenzó a desarrollarse la red vial. En 1893 se abrió la ruta entre Río Ceballos y Córdoba (actualmente Ruta E-57). En 1910 el ferrocarril llegó Unquillo, y en 1913 se abrieron rutas hasta el valle de Punilla (Page 1985). El establecimiento de la red vial y ferroviaria facilitó el acceso a las áreas boscosas (principalmente en la llanura) y en consecuencia la explotación forestal se intensificó rápidamente (Gavier-pizarro & Período, 2004).

A principios del siglo XX los desmontes ya habían afectado una gran porción de las Sierras Chicas (Laura E Hoyos et al., 2010). Extensas áreas del bosque serrano se talaron durante esa época para alimentar a los numerosos hornos de cal que funcionaban en el área (Enrique Gallardo; & Franz, 2005). Los períodos de talas más intensas coinciden con las guerras mundiales, cuando la falta de importación de carbón mineral trasladó esa demanda a los bosques autóctonos (Sayago 1969). La degradación de los bosques incrementó su susceptibilidad a los incendios iniciados en pastizales, los cuales transformaron porciones importantes de bosque en otras coberturas (principalmente arbustales) (Giorgis et al., 2013). En las áreas desmontadas por debajo de los 700 msnm comenzó a desarrollarse una agricultura intensiva, particularmente desde fines del siglo XIX (Río & Achával ,1904).

La actividad ganadera (cría de vacunos, caprinos y ovinos) también tuvo un impacto negativo sobre el bosque. El sobrepastoreo degradó la condición de los bosques del

área al eliminar la cobertura vegetal, erosionar el suelo y eliminar los renovales de muchas especies arbóreas (Luti et al. 1979).

El crecimiento urbano se intensificó durante los años 1920 y 1930, junto con el auge del turismo en la región. Numerosos campos fueron loteados para emprendimientos urbanos. Una proporción considerable de estos loteos fueron totalmente desmontados, aún antes de ser urbanizados. Muchos de ellos permanecieron sin desarrollo hasta fines del siglo XX. En el siglo XX la población creció rápidamente, particularmente en las últimas décadas (Gavier-pizarro & Período, 2004). Entre 1970 y 1991 la población se duplicó, y para el año 2001 la población siguió creciendo con una tasa similar (Indec 1970, 1991, 2003).

### 3.11. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS

#### 3.11.1. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN

El análisis de la evolución de la población en las localidades comprendidas dentro de la cuenca alta del río Guanusacate demuestra en los últimos diez años una tendencia general de crecimiento, aunque sucede lo contrario para la localidad de Ascochinga, que ha disminuido levemente su población (Tabla 5, Figura 39).

Cabe destacar que existen otras localidades de menor magnitud a las antes mencionadas, de las cuales no se encontraron datos disponibles de censos de población, como San Lorenzo, San Jorge, Cañada Martel, Colonia Hogar y Santa Sabina (Figura 40).

La escasa población de las localidades dentro de la cuenca de estudio se puede explicar por la topografía montañosa (que dificulta la accesibilidad y fácil circulación) y que condiciona el asentamiento humano y el desarrollo de la agricultura y otras prácticas agropecuarias. Además, la superficie útil para el cultivo es menor, como también la calidad de suelo a comparación de los terrenos de la cuenca media y baja (los cuales constituyen unas de las zonas más productiva de la provincia de Córdoba).



nº	Poblaciones	Censos			Variación
		1991	2001	2010	
1	Jesús María	17622	22150	31602	44%
2	Ascochinga	458	470	394	-16%
3	La Pampa	270	443	874	69%
4	Santa Catalina	61	87	74	18%
5	San Lorenzo	-	-	-	-
6	San Jorge	-	-	-	-
7	Cañada Martel	-	-	-	-
8	Colonia Hogar	-	-	-	-
9	Santa Sabina	-	-	-	-

Tabla 5: Censos de población para localidades comprendidas dentro de la cuenca de estudio y variación (%) de la población entre los años 1991 y 2010.

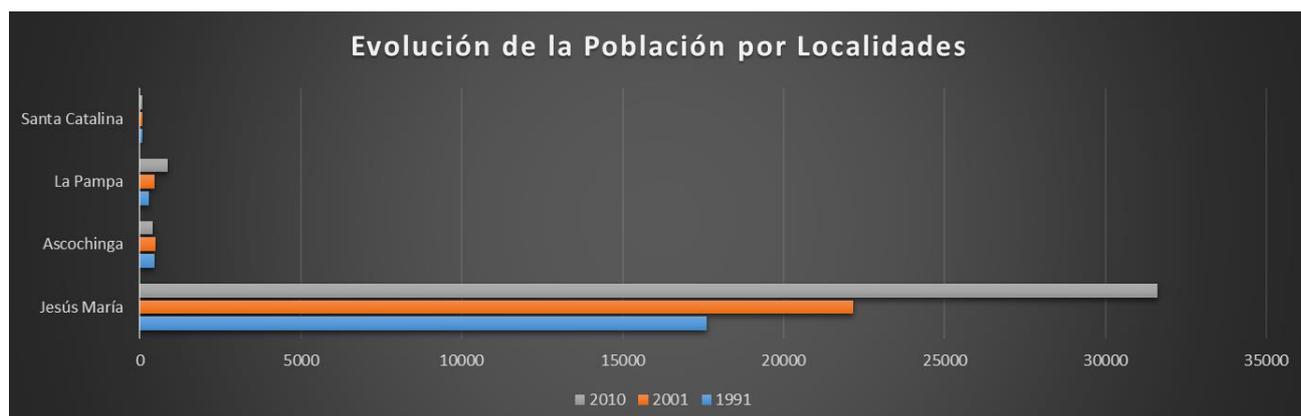


Figura 39: Evolución de la Población para las Localidades dentro de la cuenca de estudio.

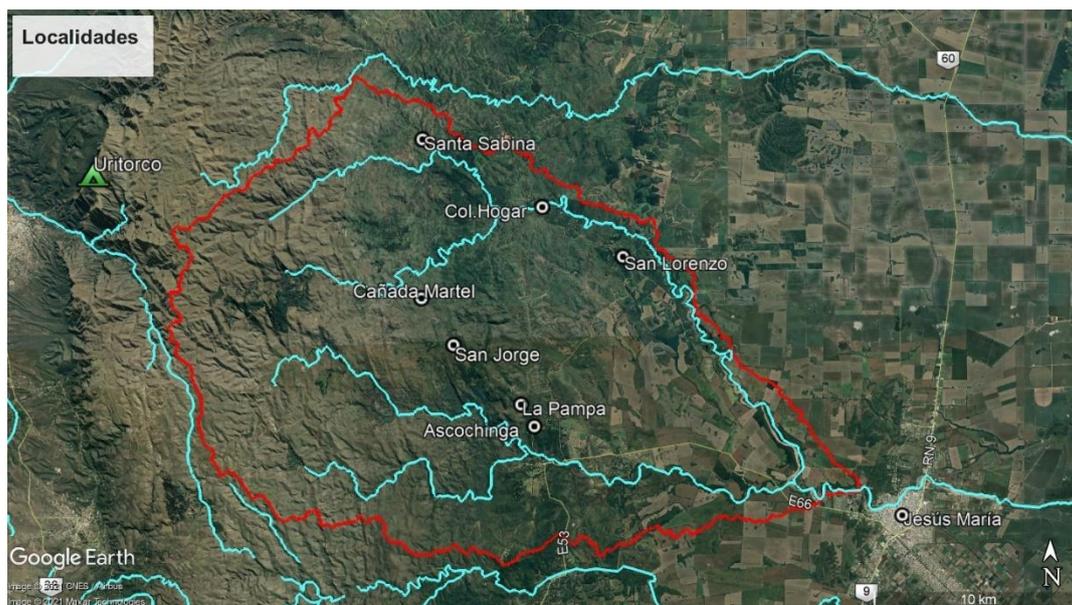


Figura 40: Ubicación de las localidades dentro de la cuenca de estudio.

### 3.11.2. CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN

La principal actividad de la cuenca alta es el turismo, dado a la baja productividad del suelo y a las altas pendientes que condicionan el laboreo de la tierra. Otra fuente de ingresos importante para estas pequeñas localidades es la elaboración de productos regionales (como alfajores, dulces caseros, conservas, etc.) destinados a la venta para el turista. La agricultura y la ganadería también tienen cierta relevancia, aunque es insignificante en comparación con los campos productivos de la cuenca media y baja.

La ciudad de Jesús María es, de acuerdo con el censo del año 2010, la décima ciudad más grande de la provincia de Córdoba y cuenta con otros sectores productivos como el industrial. Dentro de las principales industrias, cuenta con una importante planta de producción de chocolates (de la empresa Arcor), una fábrica de jabones (José Guma S.A) y un número importante de locales de elaboración alimentos y bebidas. También es significativo el número de comercios vinculados con la comercialización de automóviles, sus accesorios y repuestos; y debido a que la actividad económica regional se concentra en el sector agropecuario, es sustancial el número de comercios orientados a este rubro.

En el plano n°12 de vegetación actual de la cuenca dentro del documento 2.Planos, se indica la superficie destinada al cultivo, siendo esta última de 78,8 km<sup>2</sup> , lo que



representa el 17% del área total de la cuenca alta del río Jesús María (superficie 460,6 km<sup>2</sup>).

## 4. HIDROLOGÍA

### 4.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

En este apartado se describen los elementos de la hidrología superficial que se consideran más importantes para llevar a cabo un estudio de la cuenca analizada.

#### 4.1.1. Cuenca Hidrográfica

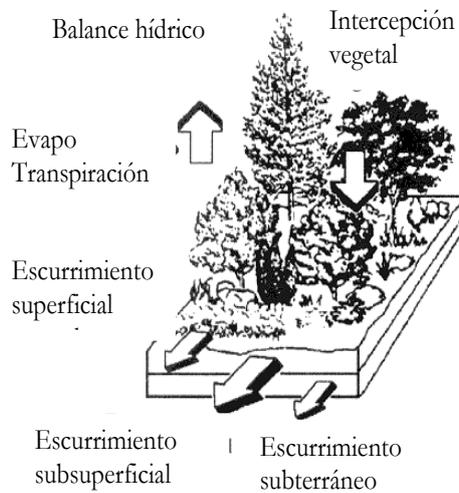
La porción de la superficie del terreno que colecta el agua de lluvia y la conduce mediante una red de drenaje hasta un punto se denomina cuenca hidrográfica. Este punto hacia el cual se dirigen todos los escurrimientos se denomina cierre o salida de la cuenca.

Una cuenca hidrográfica queda delimitada por la línea que une las divisorias de aguas. Estas líneas siguen la topografía del lugar y encierran toda la porción de terreno que dirige el escurrimiento hacia la sección de control. En áreas montañosas con relieve muy marcado y pendientes fuertes, como es el caso de la cuenca alta en estudio, las líneas divisoras de agua son de sencilla interpretación y la red de drenaje se encuentra jerarquizada con cursos de agua bien definidos.

Por otra parte, en áreas planas donde el relieve y las pendientes son leves, la red de drenaje tiende a ser pobremente jerarquizada y la dirección de los escurrimientos tiende a ser caótico, como es el caso de la cuenca baja del Río Guanusacate o Jesús María. En estas áreas planas las obras de infraestructura (camino, canales, etc.) suelen actuar de divisorias de aguas modificando muchas veces el escurrimiento natural.

Las características físicas de una cuenca hidrográfica influyen fuertemente sobre la respuesta hidrológica de la misma. Entre ellas se destacan: el área, la forma, la pendiente media de la cuenca, la densidad de drenaje, la longitud y pendiente del canal principal, el uso y el estado de humedad del suelo.

En una cuenca hidrográfica se producen la mayoría de los procesos hidrológicos que componen el ciclo del agua en una región (Figura 41).



*Figura 41: Procesos hidrológicos principales del ciclo del agua en una cuenca hidrográfica.*

A partir de los datos proporcionados por la Secretaría de Recursos Hídricos, perteneciente al Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba Argentina, se elaboró la Figura 42, que muestra la delimitación de la cuenca del Río Guanusacate. Como puede evidenciarse se trata de una cuenca hidrográfica del tipo endorreica, ya que sus aguas desaguan en la Laguna Mar Chiquita.

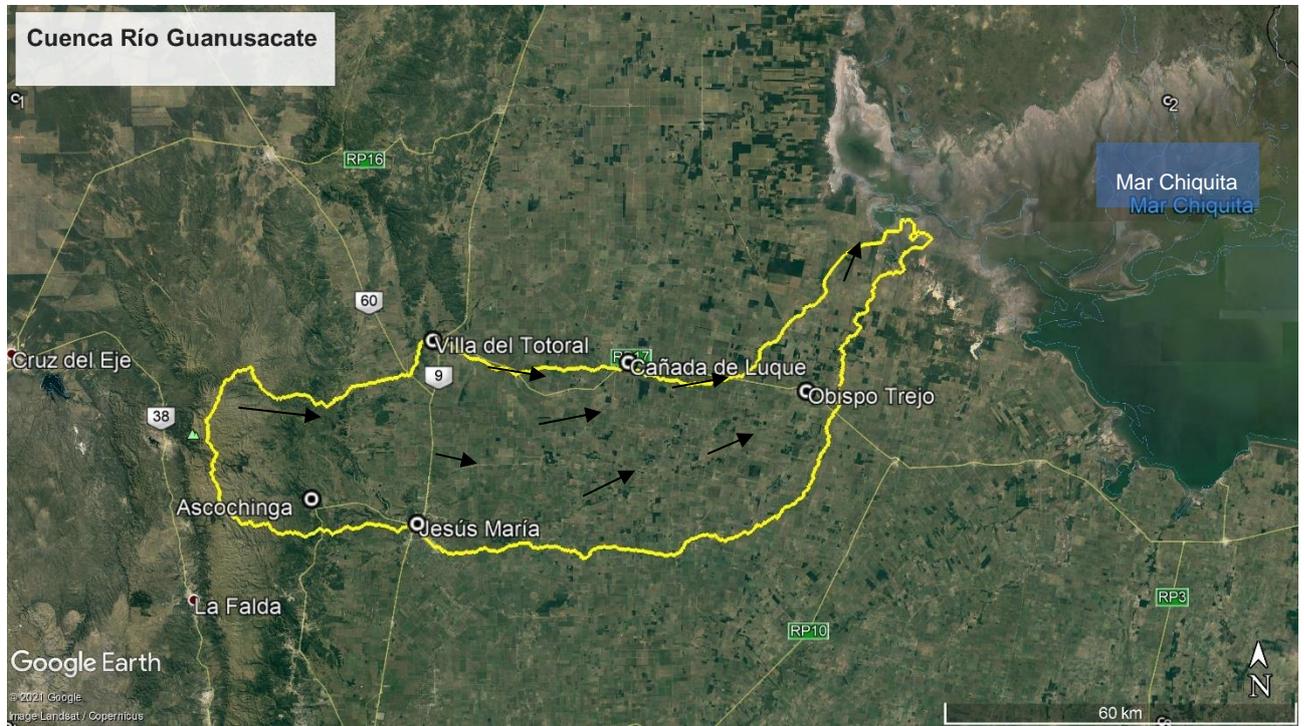
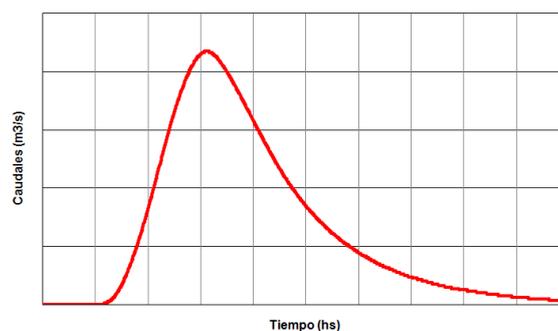


Figura 42 – Delimitación de cuenca y sentido general del escurrimiento. Fuente: Secretaría de Recursos Hídricos, Ministerio de Servicios Públicos.

#### 4.1.2. Hidrograma

Es la respuesta de una cuenca hidrográfica ante la ocurrencia de una precipitación en su área de aporte. En Hidrología las crecidas son representadas por gráficos denominados hidrogramas, en los cuales se relacionan las variaciones del caudal (ordenadas) en función del tiempo (abscisas). La Figura 43 muestra un hidrograma típico de respuesta ante una precipitación.



*Figura 43 - Hidrograma típico generado por una cuenca hidrográfica.*

#### 4.1.3. Probabilidad (P) y Tiempo de Retorno (Tr)

La probabilidad (P) en su concepción más elemental es la relación (o el cociente) entre el número de casos favorables y el número de casos posibles. Para ejemplificar, considérese un dado que posee seis caras (números 1 a 6). En una jugada cualquiera la probabilidad de salir el número 4 es  $P = 1/6$  (1 chance en 6 posibles).

El tiempo de retorno (Tr) es el número promedio de jugadas luego de las cuales el número deseado se repite. Se define como la inversa de la probabilidad:

$$Tr = \frac{1}{P}$$

*Ecuación 1: Tiempo de retorno*

Donde Tr es el tiempo de retorno y P es la probabilidad, en el caso analizado, el tiempo de retorno sería el siguiente:  $Tr = 1/(1/6)=6$ .

Utilizando los datos históricos de caudales o niveles en un lugar, puede ser estimada la probabilidad de que un determinado nivel o caudal sea igualado o superado en un año cualquiera. Para ello, es fundamental disponer de datos hidrológicos que permitan realizar esta estimación.

Supóngase, por simplicidad que un río posee un régimen hidrológico tal que provoca una crecida por año. Un tiempo de retorno de 10 años significa que, en promedio, la crecida se puede repetir cada 10 años o que en cada año la misma posee el 10% de probabilidades de ocurrir.

Dadas las características de este trabajo se adoptó la recurrencia de 25 y 100 años para el análisis hidrológico según el grado de riesgo aceptable, medidos en términos de frecuencia versus nivel de inundación, daños o riesgos asociados.

#### 4.1.4. Tormentas de Diseño

En virtud de la falta de mediciones sistemáticas de caudales en el Río Guanuscate, es posible predecir los mismos mediante el diseño hidrológico a partir de Lluvias de Diseño permitiendo, con la realización de acciones futuras, delimitar medidas



estructurales y no estructurales para modificar el impacto negativo de las precipitaciones extremas.

La tormenta de diseño es la secuencia de precipitaciones capaz de provocar la crecida de diseño en la cuenca analizada. Su determinación implica definir la duración de la lluvia, la lámina total precipitada, su distribución temporal y espacial, y la porción de dicha lámina que efectivamente contribuye a la generación de escorrentías.

Para su obtención, se empleó la metodología propuesta por el Ing. Carlos Marcelo García y el Lic. Gabriel Caamaño Nelli, (Catalini, G, Carlos M. García, Gabriel Caamaño Nelli, 2011). Esta metodología es, actualmente, la utilizada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba para la determinación de curvas i-d-f en todo el territorio provincial.

La provincia de Córdoba cuenta actualmente con valiosos estudios sobre tormentas de diseño realizados por el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional de Agua (INA-CIRSA). Esta repartición elaboró el trabajo *“Regionalización de Precipitaciones Máximas para la Provincia de Córdoba”* a partir de los registros de una red de 640 pluviómetros distribuidos en toda la provincia, de los cuales se han descartado una gran cantidad debido a muchos factores (cierre prematuro de las estaciones, falta de datos continuos, falta de observaciones puntuales, zonas con baja densidad de puestos, etc.) quedando a disposición 141 de ellos. Estos cuentan con registros diarios relativamente confiables, con longitudes de serie de entre 14 y 50 años.

En este sentido, desde hace casi 20 años el INA-CIRSA cuenta con una Red Regional de Lluvias de Diseño (RRLLD), para la predicción de lluvias críticas en la Provincia de Córdoba. La misma consta de 7 estaciones base (pluviógrafos), entorno a las cuales se dividió la región (Córdoba) en siete zonas de análisis (Tabla 6 y Figura 44).

Nro	ZONA	ESTACIÓN	PROVINCIA	Latitud	Longitud	Alt msnm
1	Noroeste	Villa Dolores	Córdoba	31°57'S	65°08'W	569
2	Sierras	La Suela	Córdoba	31°38'S	64°35'W	892
3	Noreste	Ceres	Santa Fé	29°53'S	61°57'W	88
4	Centro	Córdoba Obs.	Córdoba	31°24'S	64°11'W	425
5	Suroeste	Río Cuarto	Córdoba	33°05'S	64°16'W	436
6	Este	Marcos Juárez	Córdoba	32°42'S	62°07'W	110
7	Sur	Laboulaye	Córdoba	34°07'S	63°22'W	137

*Tabla 6: Zonas pluviográficas consideradas para Córdoba y estaciones base.*

*Fuente: INA-CIRSA.*

Entre los parámetros que se utilizaron para dividir la provincia en zonas homogéneas se encuentra la similitud climática y topográfica entre las zonas, y trayectoria y estructura de la tormenta similar.

Se puede definir “zona homogénea” como áreas donde todos los puntos experimentan eventos mediante iguales mecanismos de tormenta y movimientos totales de aire, pero no necesariamente con el mismo cambio de humedad o con igual frecuencia. Realizando el análisis, se definieron las zonas homogéneas como se muestra en Figura 44, donde puede observarse la zona de estudio corresponde principalmente a la Zona Sierras y parte a la Zona centro.

A los registros de los pluviómetros finalmente seleccionados se le extrajeron los valores máximos mensuales de lluvia diaria. Luego, a partir de ellos se obtuvo el mayor valor para cada año y se obtuvieron así las series anuales de lluvias máximas diarias por estación.

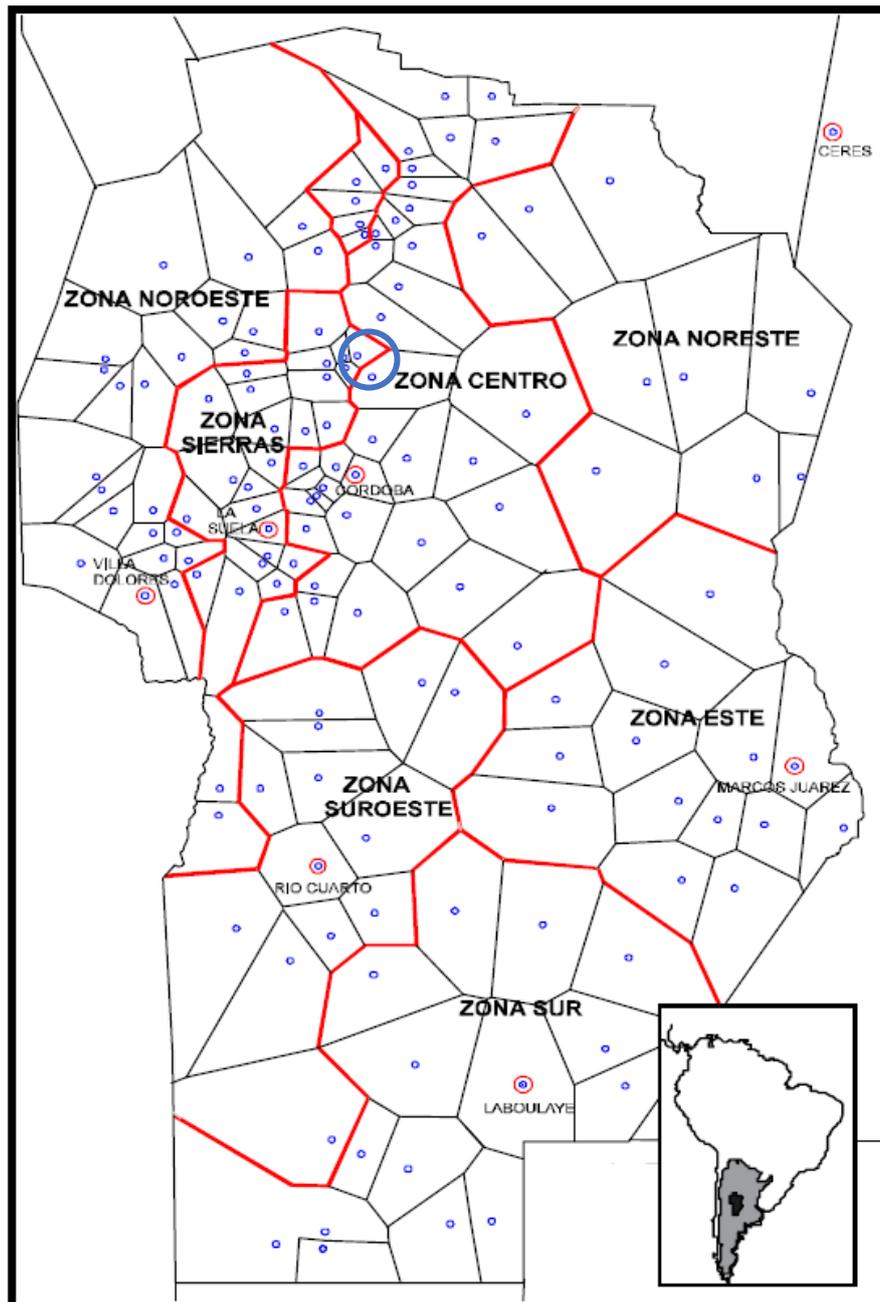


Figura 44 – Mapa de zonificación pluvial de la Provincia de Córdoba. Con el círculo de color azul se indica la zona de estudio.

Siguiendo la metodología propuesta, la determinación de las tormentas de diseño se obtuvieron a partir de datos correspondientes a las estaciones de Puesto Viejo, Alto

de Fresco, Ascochinga, La Pampa y Jesús María que se pueden observar en la Figura 45.

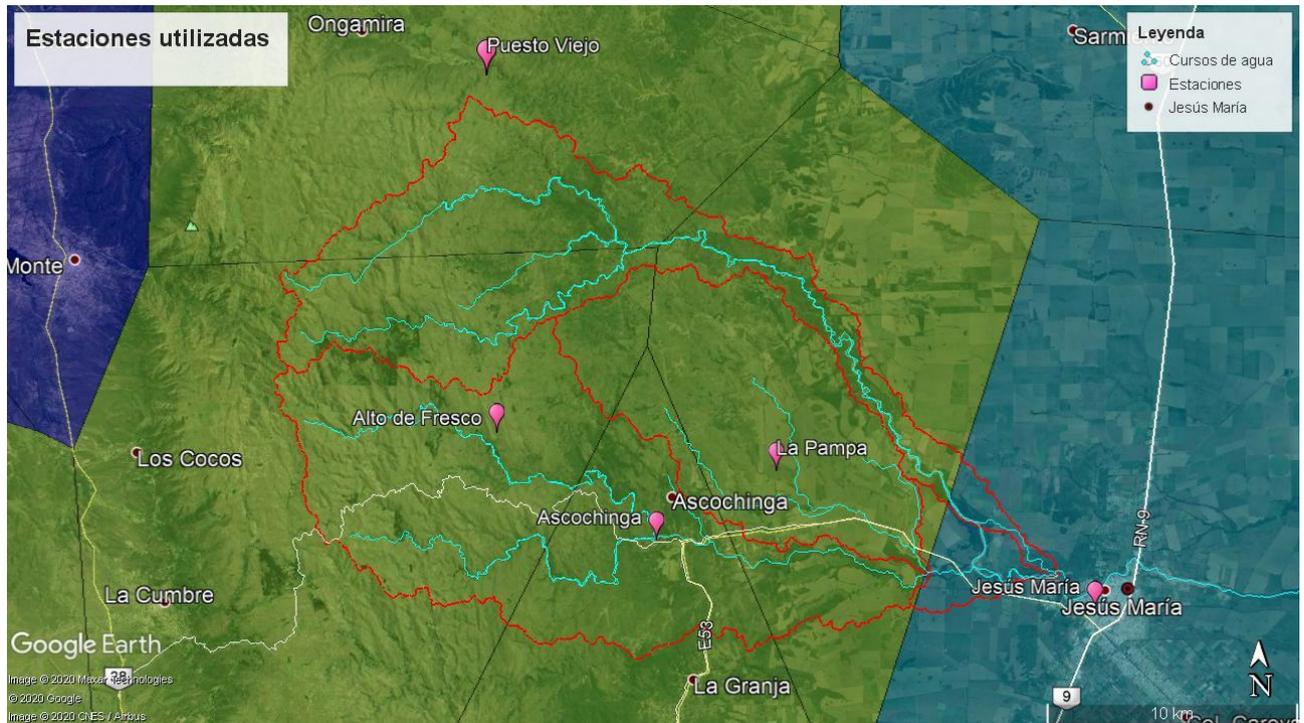


Figura 45: Estaciones utilizadas para la modelación hidrológica en la cuenca alta del Río Jesús María. En donde es posible también observar la división en 4 subcuencas realizada para una mejor representación de la realidad con el modelo hidrológico.

#### 4.1.4. Tiempos de concentración

El tiempo de concentración ( $t_c$ ) de una cuenca es el tiempo que le toma a la lámina de lluvia precipitada en el punto hidrológicamente más alejado de la cuenca, llegar a la salida o cierre de la misma.

Se define al  $t_c$  como una medida del tiempo en el cual la totalidad de la cuenca aporta escurrimiento superficial a la sección de cierre de la misma. Por esto mismo se utiliza este concepto para definir la duración de las tormentas de proyecto.

Los tiempos de concentración se obtienen de forma empírica mediante el empleo de diferentes fórmulas donde se han seleccionado aquellas que se ajusten mejor a la cuenca en estudio, y que se muestran a continuación:

#### **Método racional generalizado:**



Donde,  $t_c$  es el tiempo de concentración (horas), L es la longitud del curso de agua más largo (km), H es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m) y n es el coeficiente de rugosidad del cauce.

$$t_c = \left( \frac{60 * n * L}{(H)^{0,3}} \right)$$

*Ecuación 2: Tc según Método racional generalizado*

### **Temez:**

Fórmula muy utilizada en España donde  $t_c$  es el tiempo de concentración (horas), L es la longitud del curso de agua más largo (km) y S es la pendiente promedio del cauce principal (m/m).

$$t_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$$

*Ecuación 3: Tc según Temez*

### **Pilgrim y McDermott**

Desarrollada para cuencas rurales con redes de escurrimiento dendríticas, donde  $t_c$  es el tiempo de concentración (horas) y A es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

$$t_c = 0,76 * A^{0,76}$$

*Ecuación 4: Tc según Pilgrim y McDermott*

### **Bransby-Williams**

Donde L es la longitud del curso de agua más largo (km), S es la pendiente promedio del cauce principal (m/m) y A es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

$$t_c = \frac{14,6 * L}{A^{0,1} * S^{0,2}}$$

*Ecuación 5: Tc según Bransby-Williams*

## SCS

Donde L es la longitud del curso de agua más largo (km), S es la pendiente promedio del cauce principal (m/m) y CN es el número de curva de escorrentía, el cuál se puede estimar mediante el uso de tablas o mediante técnicas SIG (sistemas de información geográfica) a partir del procesado de imágenes satelitales.

$$t_c = \frac{100 * L^{0,8} * \left[ \frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0,7}}{1900 * (S * 100)^{0,5}}$$

*Ecuación 6: Tc según SCS.*

Una práctica común en la Hidrología Aplicada es utilizar el valor medio de los valores de  $t_c$  calculados por distintas fórmulas, eliminando los valores extremos, de esta forma se obtuvo el tiempo de concentración para las cuatro subcuencas (ver Figura 45) definidas como se puede ver en Tabla 7 y Tabla 8. De esta manera los resultados obtenidos de las fórmulas empíricas de Pilgrim & McDermott y SCS son descartados dado a que representan los valores mínimos y máximos respectivamente.

Posteriormente a partir de los tiempos de concentración calculados, se introducen en el modelo hidrológico HEC HMS dentro de las propiedades de cada subcuenca.

Subcuencas	Parámetros Físicos						n
	A (Ha)	A (Km2)	L (km)	H (m)	S (m/m)	Sc (%)	
1	1393.04	13.93	6.6	42	0.0064	0.64	1
2	10109.83	101.1	20.75	23	0.0011	0.11	1
3	17324.39	173.24	37.9	30	0.0008	0.08	1
4	13234.48	132.34	48.3	31	0.0006	0.06	1
<b>Total</b>		<b>420.62</b>	<b>113.55</b>	<b>126</b>			

*Tabla 7: Parámetros físicos de las subcuencas*



Subcuencas	Tiempo de Concentración							
	Ecuaciones					General	Lag time	
	1	2	3	4	5		(min.)	(hs.)
1	129	267.4	124.1	203.2	710.2	199.9	119.92	2
2	486	988.6	263.5	743.1	4254.9	739.2	443.54	7.39
3	819.7	1699.9	323.3	1375.6	8152.7	1298.4	779.04	12.98
4	1034.4	2153.9	291.9	1878.1	10992.1	1688.8	1013.28	16.89

Tabla 8: Tiempo de concentración de las subcuencas.

#### 4.1.5. Hietogramas de proyecto

La distribución de la lámina en el tiempo puede lograrse a partir de datos relevados o bien mediante métodos empíricos. Existen diversos métodos para estimar la distribución temporal de la tormenta de proyecto. Para el presente estudio se adoptó el criterio de *patrones probables por períodos* del informe presentado por el INACIRSA. En dicho análisis se establecen los porcentajes de lámina precipitada dividiendo la duración de la tormenta en 6 intervalos, de los cuales uno contiene el pico (de mayor intensidad) y los restantes decrecen en forma progresiva. La frecuencia de aparición de la posición del pico disminuye a medida que el patrón de tormenta se retrasa, es decir, que el patrón de lluvia con pico ubicado en el primer intervalo posee la mayor probabilidad de ocurrencia. Esta probabilidad decrece cuando el pico se ubica hacia los últimos sextiles o intervalos. A continuación, se muestran los hietogramas utilizados para el modelo hidrológico:

#### 1. Tormenta de diseño: $T_r=25$ años y duración de 2 horas.

ZONA SIERRAS		Intensidad	40.38	mm/min
Sextil [%]	%	Duración	120	min
		Tiempo de retorno	25	años
		Intervalo [min]		
1	12%	20	4.8	
2	49%	40	19.8	
3	23%	60	9.3	
4	9%	80	3.6	
5	4%	100	1.6	
6	3%	120	1.2	
<b>TOTAL</b>			<b>40.38</b>	

Tabla 9: Lluvia de 120 minutos y Tiempo De Retorno de 25 años.

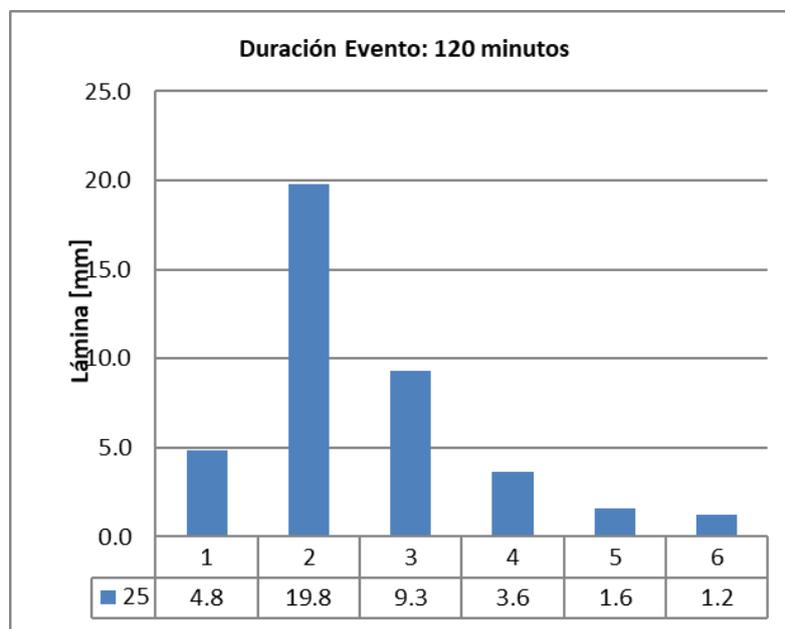


Figura 46: Hietograma para lluvia de 120 min y TR=25 años.

## 2. Tormenta de diseño: Tr=25 años y duración de 6 horas.



ZONA SIERRAS		Intensidad	60	mm/min
Sextil [%]	%	Duración	360	min
		Tiempo de retorno	25	años
		Intervalo [min]		
1	12%	60	7.2	
2	49%	120	29.4	
3	23%	180	13.8	
4	9%	240	5.4	
5	4%	300	2.4	
6	3%	360	1.8	
TOTAL			60	

Tabla 10: Lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 25 años.

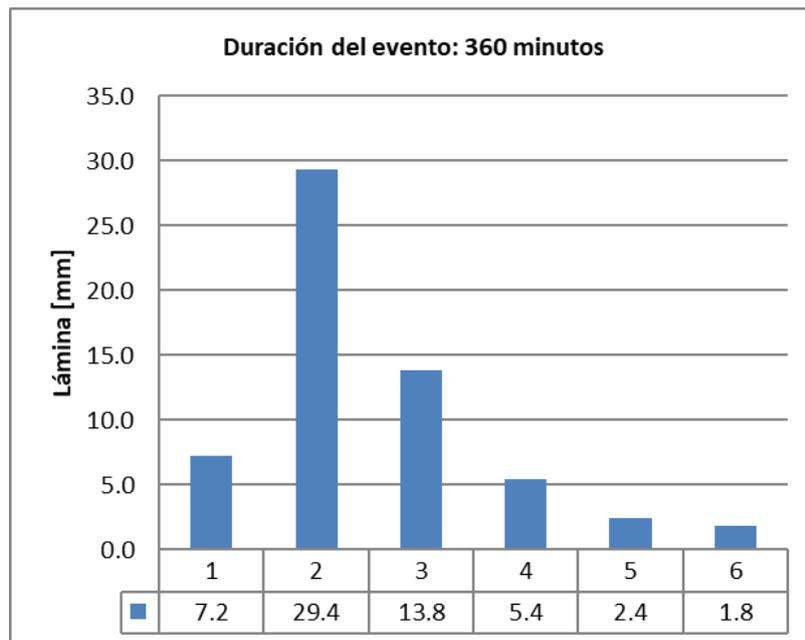


Figura 47: Hietograma para lluvia de 360 min y TR=25 años.

### 3. Tormenta de diseño: Tr=100 años y duración de 2 horas.

ZONA SIERRAS		Intensidad	48.2	mm/min
		Duración	120	min
Sextil [%]	%	Tiempo de retorno	100	años
		Intervalo [min]		
1	12%	60	5.8	2.9
2	49%	120	23.6	11.8
3	23%	180	11.1	5.5
4	9%	240	4.3	2.2
5	4%	300	1.9	1
6	3%	360	1.4	0.7
TOTAL			48.2	

Tabla 11: Lluvia de 120 minutos y tiempo de retorno de 100 años.

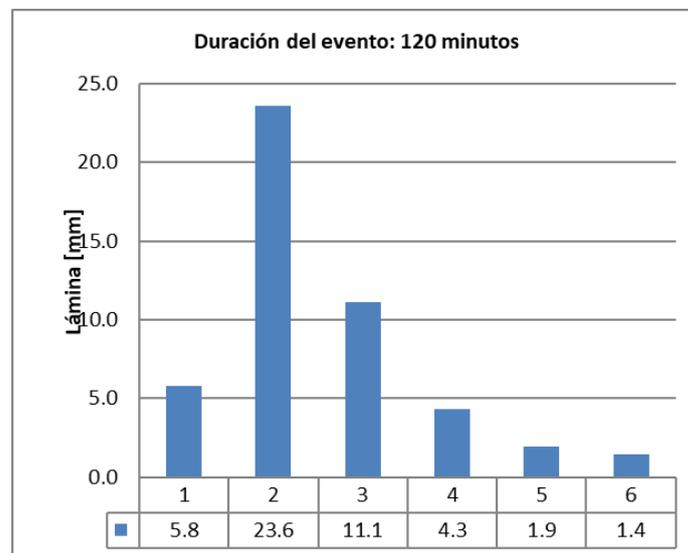


Figura 48: Histograma para lluvia de 120 minutos y tiempo de retorno de 100 años.

#### 4. Tormenta de diseño: $T_r=100$ años y duración de 6 horas.



ZONA SIERRAS		Intensidad	71.61	mm/min
Sextil [%]	%	Duración	360	min
		Tiempo de retorno	100	años
		Intervalo [min]		
1	12%	30	8.6	4.3
2	49%	60	35.1	17.5
3	23%	90	16.5	8.2
4	9%	120	6.4	3.2
5	4%	150	2.9	1.4
6	3%	180	2.1	1.1
<b>TOTAL</b>			<b>71.61</b>	

Tabla 12: Lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 100 años

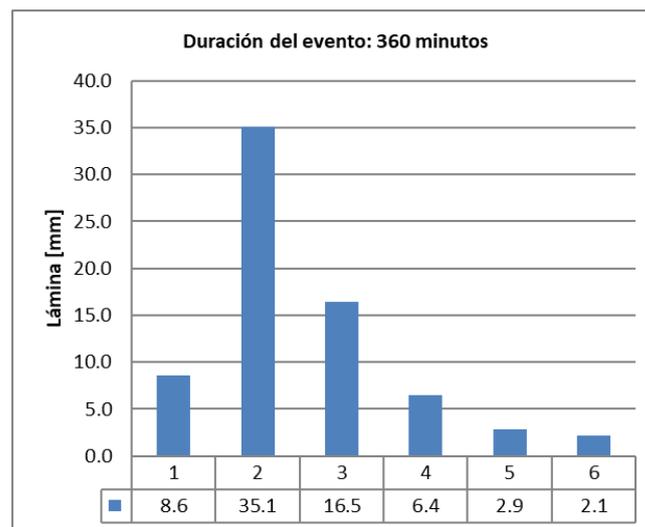


Figura 49: Hietograma para lluvia de 360 minutos y tiempo de retorno de 100 años.

#### 4.1.6. Proceso de transformación Lluvia-Caudal

El proceso mediante el cual la precipitación ocurrida sobre una cuenca deviene en escurrimiento superficial se denomina Transformación Lluvia-Caudal. El mismo consta de una combinación de dos funciones, una Función de Producción y una Función de Transferencia.

La Función de Producción define qué porcentaje del total de la precipitación escurre superficialmente, es decir, determina la precipitación efectiva. Existen diversos

métodos para determinar esta precipitación efectiva, por ejemplo, el método del Índice  $\Phi$ , Horton, Green y Ampt, etc.

La Función de Transferencia define cómo se transporta ese volumen (la precipitación efectiva) a través de la cuenca, es decir, determina el hidrograma a la salida de la cuenca, provocado por una precipitación efectiva.

#### 4.1.6.1. Precipitación Efectiva

Para poder determinar la lámina efectiva, en este estudio se utilizó el método desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS).

La hipótesis del método del SCS consiste en que la relación entre la lámina de lluvia efectiva ( $P_e$ ) y la lámina precipitada total ( $P-I_a$ ) es igual a la relación entre la lámina total retenida por la cuenca ( $F_a$ ) y la máxima retención potencial ( $S$ ), es decir,

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

*Ecuación 7: Hipótesis del método del SCS.*

Suponiendo relaciones entre los términos de la misma, se llega a la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

*Ecuación 8: Lámina de lluvia efectiva*

Esta última, es la ecuación básica para el cálculo de esorrentía directa de una tormenta, utilizando el método del SCS.

La relación entre  $P$  y  $P_e$  está representada por curvas para las cuales se define un número adimensional CN, tal que  $0 \leq CN \leq 100$ . Para superficies impermeables y superficies de agua,  $CN = 100$ ; para superficies naturales,  $CN < 100$ .

El número de curva (CN) y máxima retención potencial (S) se relacionan por:



$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

*Ecuación 9: Máxima retención potencial.*

Los números de curva han sido tabulados por el SCS con base en el grupo hidrológico del suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos hidrológicos de suelo:

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas pocas profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Los valores de CN para diferentes condiciones de usos de la tierra se observan en la Tabla 13: Numero de Curva (Soil Conservation Service).

Los Suelos típicos del lugar de estudio son suelos poco profundos depositados por el viento, limos y limos arenosos. Estos suelos pertenecen al grupo hidrológico situado entre los tipos A o B.

A fin de simplificar el estudio y luego de analizar estudios de suelo de la zona de estudio se adoptó un CN=73 para toda la superficie de la cuenca alta del río Guanuscate donde se centró el estudio.

Descripción del Uso de la Tierra	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada: Sin tratamientos de conservación	68	79	86	89
Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño promedio del lote      % promedio impermeable				
1/8 acre o menos                      65	77	85	90	92
1/4 acre                                      38	61	75	83	87
1/3 acre                                      30	57	72	81	86
1/2 acre                                      25	54	70	80	85
1 acre                                        20	51	68	79	84
Estacionamientos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

*Tabla 13: Numero de Curva (Soil Conservation Service)*

#### 4.1.7. Modelo Hidrológico

El modelo empleado para la simulación hidrológica fue el Sistema de Modelación Hidrológica (HMS) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (HEC).

Este modelo tiene una gran difusión en el medio técnico profesional vinculado a la hidrología, por lo que su utilización constituye prácticamente una forma de estandarizar resultados y procedimientos de modelaciones a fin de su rápida comparación.

Para el proceso de transformación lluvia-caudal se seleccionó la metodología basada en el hidrograma adimensional del SCS.

Las pérdidas de lámina por infiltración serán calculadas por el programa con base en el método de abstracciones desarrollado por el SCS, el cual fue descrito y desarrollado anteriormente. En la Figura 50 se muestra la implementación del modelo para las cuatro subcuencas analizadas.

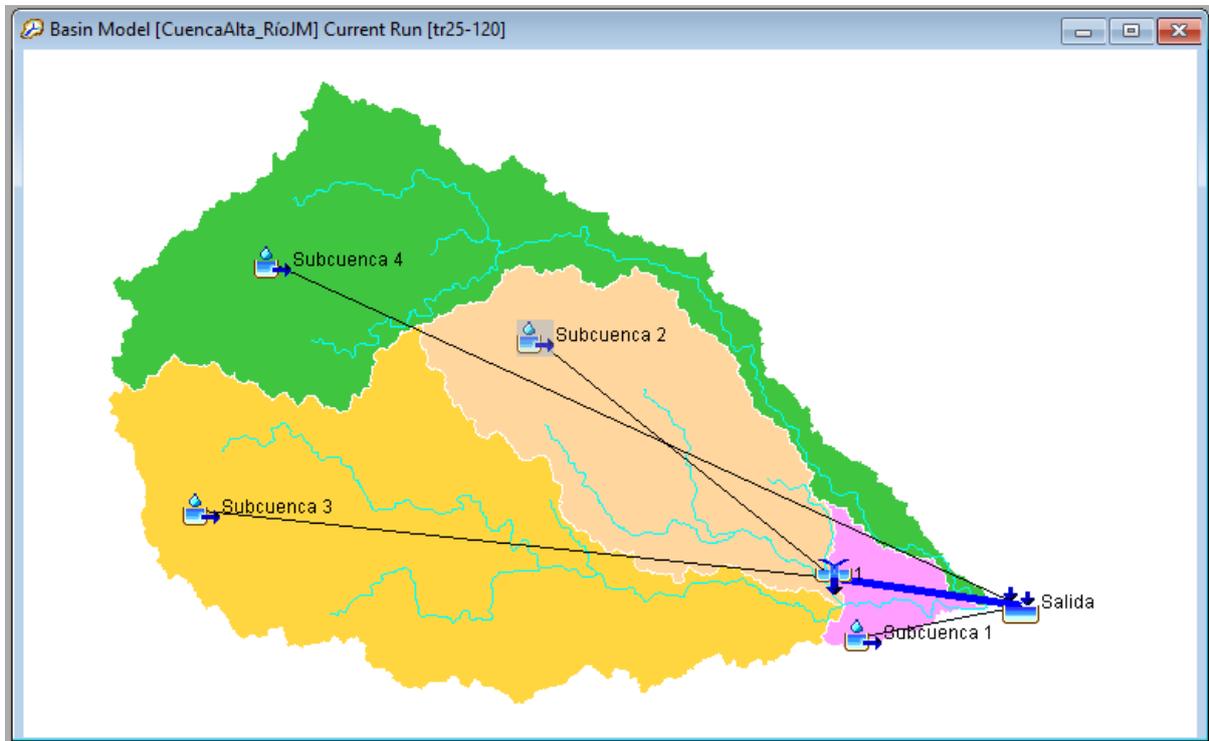


Figura 50: Esquema modelo HMS.

#### 4.1.8. Resultados del modelo

Una vez incorporado todos los datos al modelo hidrológico, incluido los hietogramas del apartado 4.1.5. se obtuvieron los caudales de proyecto que se muestran en Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Figura 54. En cada una de dichas figuras se observarán cuatro hidrogramas correspondientes a: el caudal máximo (que corresponde con la salida de la cuenca de estudio y que es el resultado de la suma de las cuatro subcuencas), el caudal de salida de la subcuenca 1, el caudal resultante de la subcuenca 2 y 3 (que se vinculan en el nudo 1, ver Figura 50) y caudal de la subcuenca 4 (que al igual que la subcuenca 1 se conectan directamente a la salida de la cuenca).

##### 1. Hidrograma de diseño: $T_r=25$ años y duración de 2 horas.

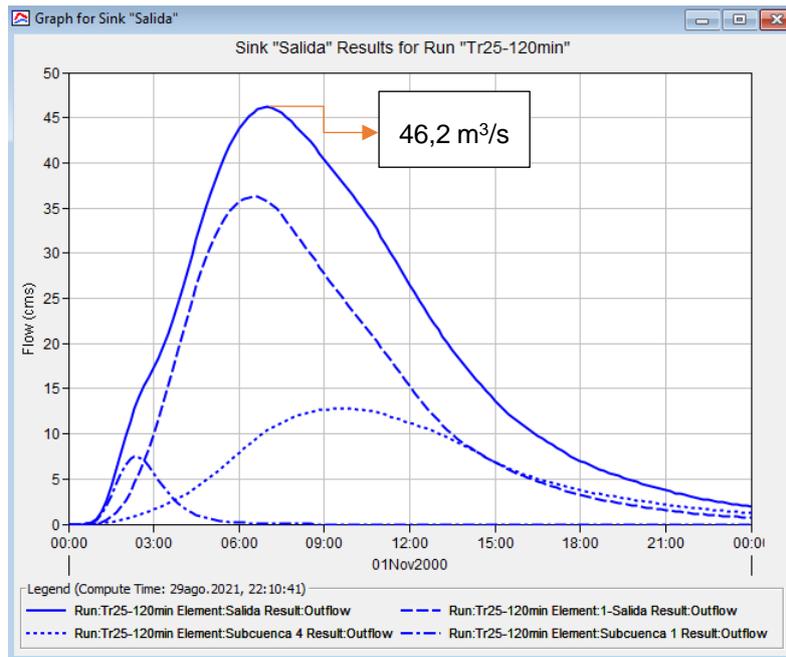


Figura 51: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un  $Tr=25$  años y duración de lluvia de 2 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:  $46,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 2. Tormenta de diseño: $Tr=25$ años y duración de 6 horas.

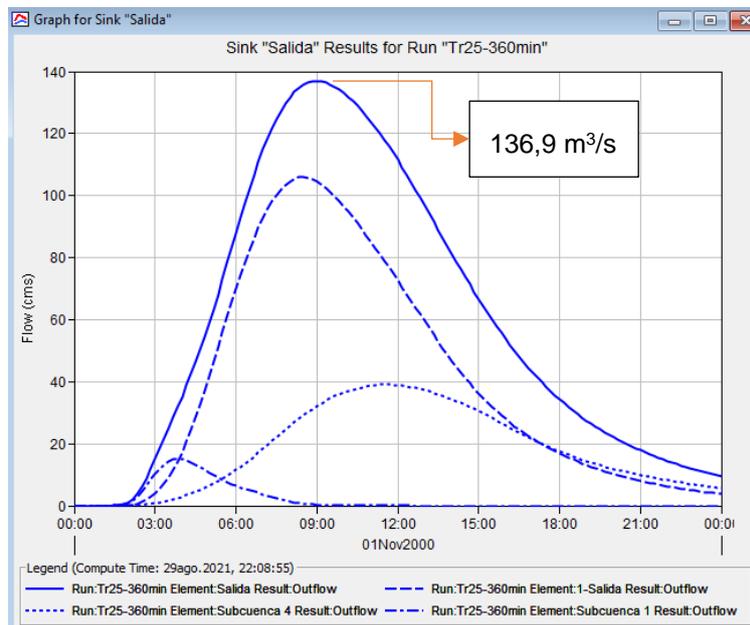


Figura 52: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un  $Tr=25$  años y duración de lluvia de 6 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:  $136,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 3. Hidrograma de diseño: $Tr=100$ años y duración de 2 horas.

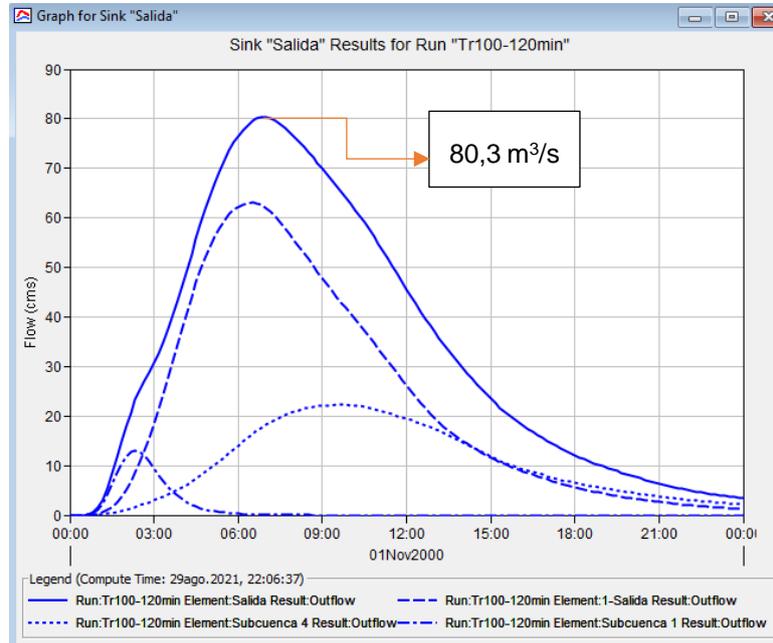


Figura 53: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un  $Tr=100$  años y duración de lluvia de 2 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:  $80,3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4. Hidrograma de diseño: $Tr=100$ años y duración de 6 horas.

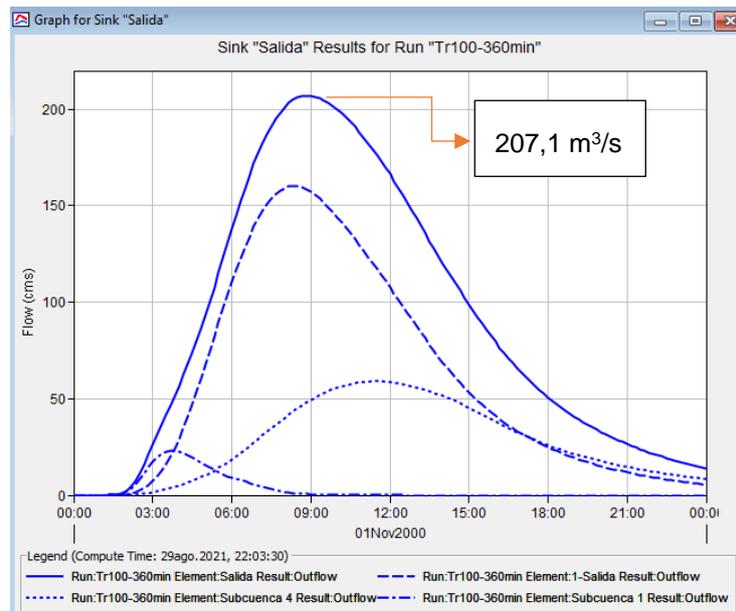


Figura 54: Hidrogramas de la cuenca de estudio para un  $Tr=100$  años y duración de lluvia de 6 hs. Caudal Pico a la salida de la cuenca:  $207,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CUENCA

La cuenca en estudio y sus principales subcuencas (Figura 55) fueron caracterizadas mediante sus propiedades físicas generales, relacionadas con el relieve y con la forma de las mismas. En la Tabla 14 se muestran las mediciones del área (A), el perímetro (P) y el Diámetro (D), entendiéndose como tal a la distancia recta entre el cierre de la cuenca y el punto más alejado sobre el perímetro de cada unidad (Barbeito et al., 2017).

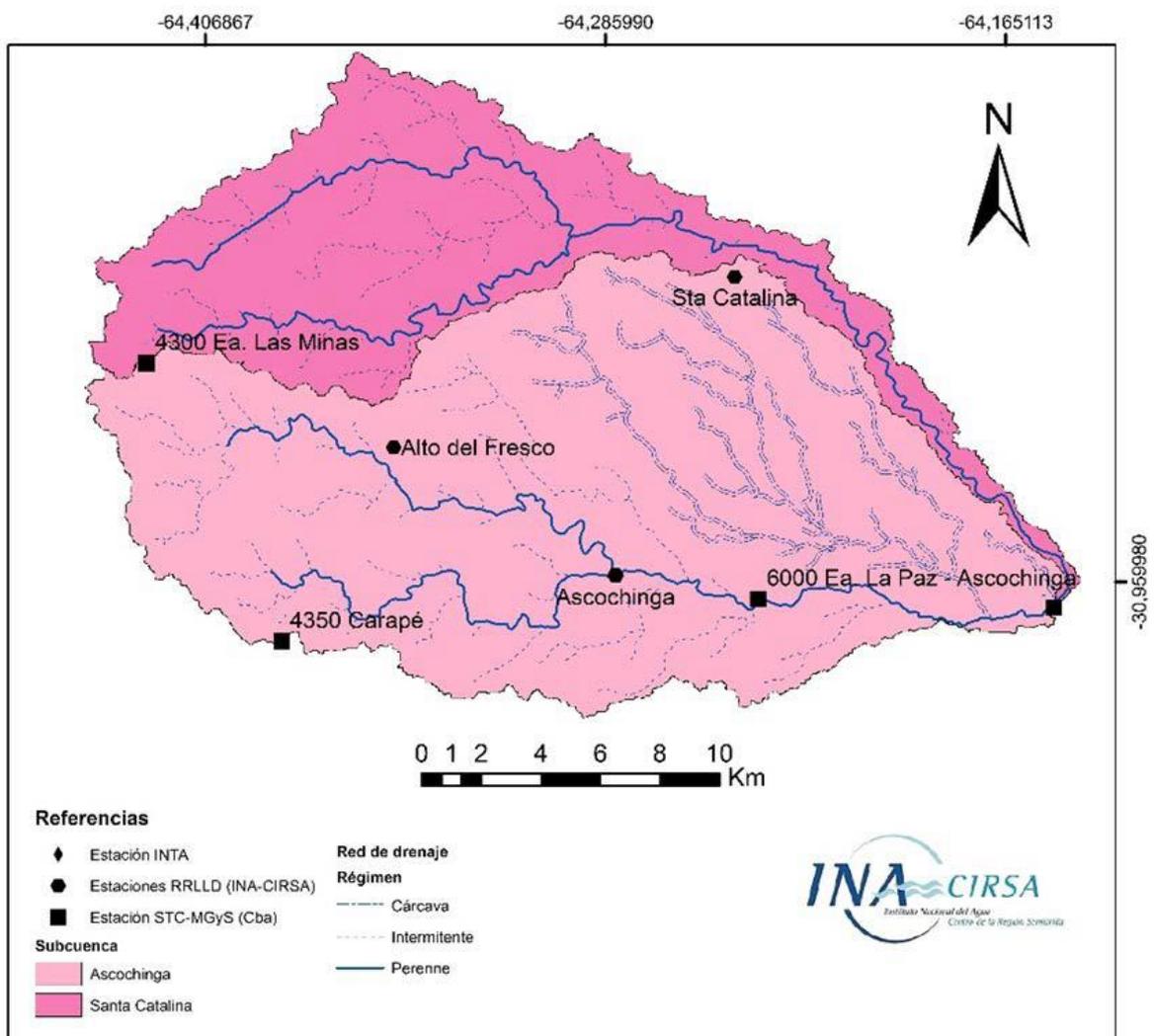


Figura 55: Delimitación de la cuenca en estudio con sus principales subcuencas.

Fuente: INA-CIRSA.



Parámetros	Ascochinga	Santa Catalina
Área - A (km <sup>2</sup> )	288.27	132.34
Perímetro - P (km)	162.72	110.48
Longitud (Km)	33.38	38.36
Diámetro - D (km)	29.00	30.00

Tabla 14: Parámetros de las dos subcuencas principales. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.1. Parámetros de Forma

##### 4.2.1.1. Coeficiente de compacidad de Gravelius (K<sub>c</sub>)

Es uno de los índices más usados en la determinación de la forma de la cuenca, siendo este la relación existente entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo que tenga la misma superficie (A) que dicha cuenca. La cuenca alta del río Guanusacate posee un perímetro de 113,10 Km. y un área de 460,61 Km<sup>2</sup>, obteniéndose un valor de este coeficiente de 1,54, calculado en base a la expresión siguiente:

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 10: Coeficiente de compacidad de Gravelius.

El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano a ella se encuentre, más se aproximará su forma a la del círculo, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir caudales con mayores picos. Por contrapartida, cuando “K<sub>c</sub>” se aleja más del valor unidad significa un mayor alargamiento en la forma de la cuenca. De acuerdo con el rango de valores visto en el curso de Ordenación y Restauración de Cuencas Torrenciales (Tabla 15) se puede definir a la forma de la cuenca entre ovalada y oblonga.

Kc	Forma
1-1,25	Circular
1,25 - 1,5	Ovalada
1,5 - 1,75	Oblonga

*Tabla 15: Factor Kc.*

#### 4.2.1.2. Factor de Forma (F) de Horton (1932)

Este Factor de forma es el cociente entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima.

$$F = \frac{A}{L^2}$$

*Ecuación 11: Factor de Forma de Horton*

Donde L representa la longitud de la cuenca, medida desde el punto más distante del perímetro hasta el cierre de la cuenca, y A, el área de drenaje.

#### 4.2.1.3. Relación de elongación (Schumm, 1956)

Este factor se define como la relación entre el diámetro de un círculo de igual área de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca:

$$R_e = \frac{d}{L}$$

*Ecuación 12: Relación de elongación (Schumm, 1956)*

#### 4.2.1.4. Relación de circularidad de Miller (1956)

Representa el cociente entre el área de la cuenca y el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. Este valor nunca excede a 1. La relación de circularidad está influenciada por factores tales como la pendiente, el relieve, la litología y la tectónica del terreno.



$$R_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{p^2}$$

*Ecuación 13: Relación de circularidad de Miller (1956)*

Estos factores junto con otras características de las subcuencas se encuentran expresados en la Tabla 16.

Parámetros	Ascochinga	Santa Catalina
Índice de Compacidad de Gravelius - K <sub>c</sub> [Adim.]	2.68	2.69
Factor de Forma de Horton - F [Adim.]	0.26	0.09
Relación de Elongación de Schumm - R <sub>e</sub> [Adim.]	0.87	0.78
Relación de Circularidad de Miller - R <sub>c</sub> [Adim.]	0.137	0.136

*Tabla 16: Parámetros de forma para las subcuencas principales.*

#### 4.2.2. Parámetros del relieve

Para determinar los parámetros de relieve, se utilizó como base un mapa de curvas de nivel con equidistancia de 100m. Se encontraron las altitudes: máxima y mínima, el desnivel, la longitud del cauce principal y la pendiente media uniforme del mismo. Los valores numéricos de estos parámetros se resumen en la Tabla 17.

Parámetros de Relieve		
Parámetros	Ascochinga	Santa Catalina
Desnivel de la cuenca (ΔH) [m.s.n.m.]	1250.0	1291.0
Altitud Maxima cuenca (Hmax) [m.s.n.m.]	1818.0	1858.0
Altitud Minima de la cuenca (Hmin) [m.s.n.m.]	568.0	567.0
Longitud del Cauce Principal - L [km]	41.8	50.3
Pendiente Media Uniforme del Cauce Principal -S [%]	3.0	2.6

*Tabla 17: Parámetros de relieve de la cuenca y subcuencas. Fuente: INA-CIRSA.*

Como puede observarse, la pendiente media del cauce principal presenta un valor de 3% (para Ascochinga), es decir que cada 100 m sobre el terreno hay un desnivel de 3

metros, de igual manera se puede hacer para el río Santa Catalina, con una pendiente media de 2,6% (Barbeito et al., 2017).

#### 4.2.2.1. Pendiente media

La pendiente media del terreno en la cuenca da idea del efecto del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce. Su cálculo se ha realizado mediante técnicas SIG, a partir del histograma de frecuencias del mapa de pendientes de la cuenca, obteniéndose un valor de pendiente media del 17,89%, expresado numérica y gráficamente (con trazo en rojo) en la Figura 56.

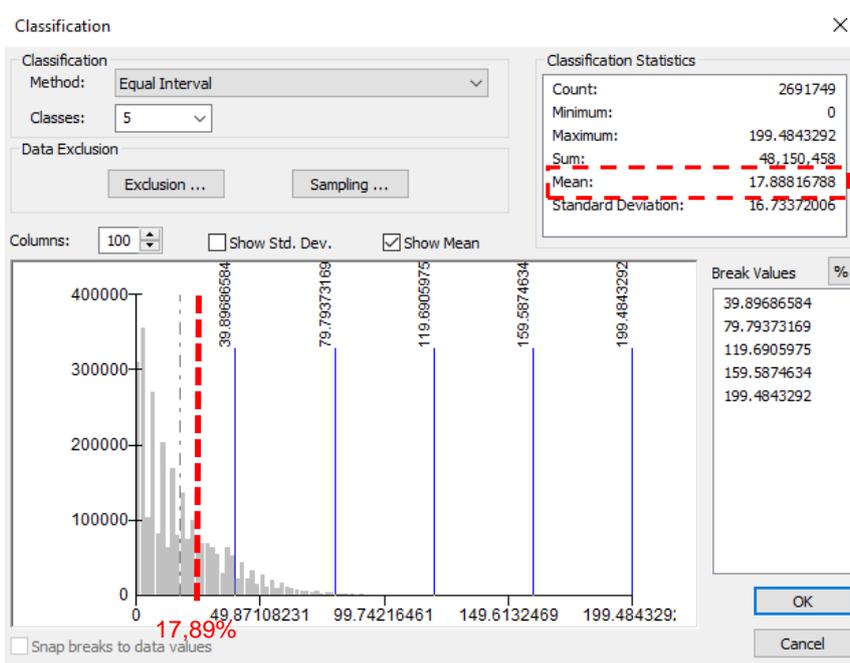


Figura 56: Histograma de frecuencias de la pendiente y cálculo de la pendiente media. Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.2. Curva hipsométrica:

Por otra parte, se representaron las curvas hipsométricas, las que indican el porcentaje de área de la cuenca que existe sobre una cota determinada, señalando la variación altitudinal y permitiendo obtener la mediana (50%) de la superficie. Con respecto a la Subcuenca Santa Catalina, se puede observar que el 50% de su área presenta alturas mayores a los 1180 metros; mientras que para la Subcuenca Ascochinga las altitudes superan los 932,5 metros en el 50% de su área (Figura 57 y Figura 58), mientras que el valor de la mediana, para toda la cuenca de estudio es de



954,0 msnm, lo cual significa que un 50 % del área de la cuenca posee altitudes por encima de dicho valor (Barbeito et al., 2017).

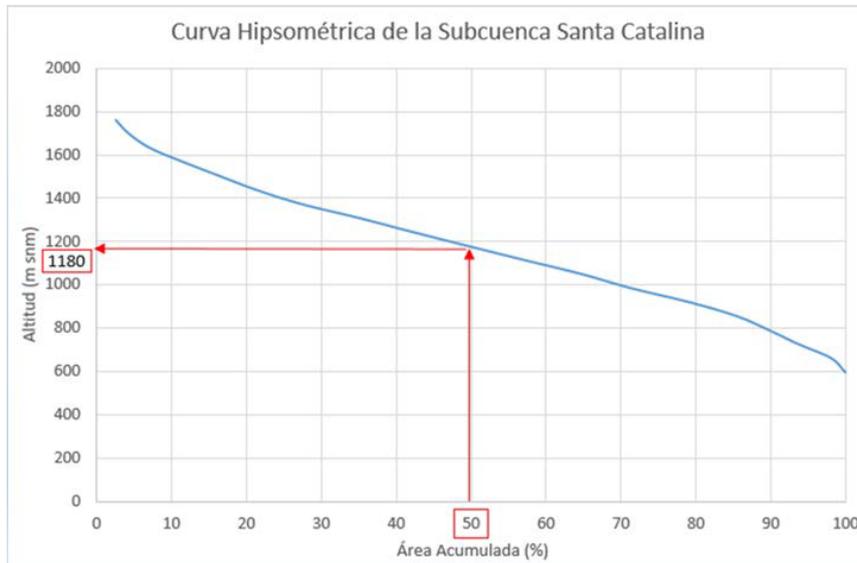


Figura 57: Curva hipsométrica para la Subcuenca Santa Catalina. Fuente: INA-CIRSA

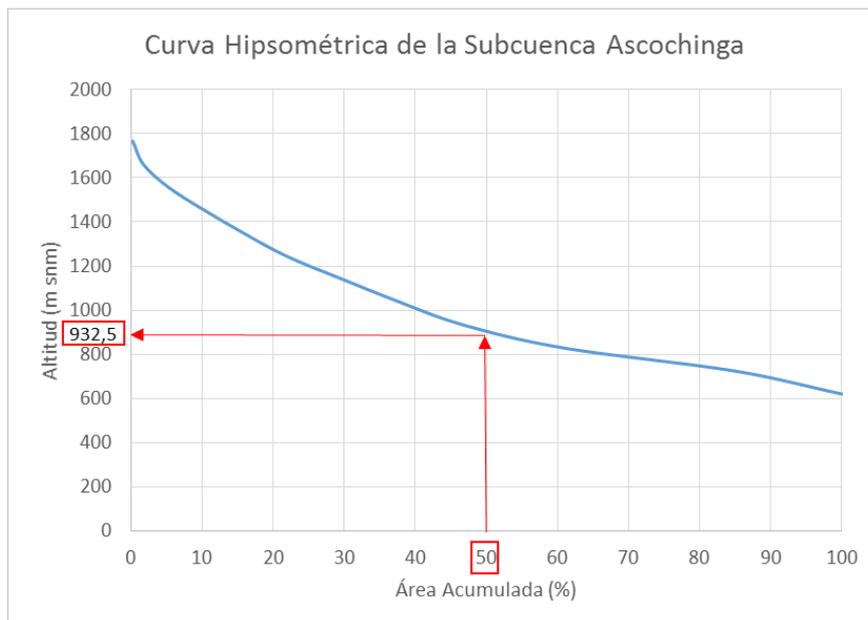


Figura 58: Curva hipsométrica para la Subcuenca Ascochinga. Fuente: INA-CIRSA.

#### 4.2.3. Parámetros relativos a la red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca está formada por el cauce principal y los afluentes que se incorporan al mismo a medida que el curso de agua llega a la salida de la cuenca. Para un correcto estudio de la red de drenaje se ha hecho uso de herramientas SIG para ordenar a la misma en base a un criterio jerárquico.

##### 4.2.3.1. Orden de la cuenca:

Para determinar el orden de la red de drenaje en la cuenca de estudio se ha empleado la clasificación de Strahler:

#### **Método de Strahler**

En el método de Strahler, se asigna un orden de 1 a todos los cursos sin afluentes y se los conoce como cursos de primer orden. La clasificación del drenaje aumenta cuando los cursos del mismo orden confluyen. Por lo tanto, la confluencia de dos cursos de primer orden creará un curso de segundo orden, la confluencia de dos cursos de segundo orden creará un curso de tercer orden, y así sucesivamente.

Sin embargo, la confluencia de dos cursos de distintos órdenes no aumentará el orden. Por ejemplo, la confluencia de un curso de primer orden y segundo orden no creará un curso de tercer orden, pero mantendrá el orden del curso con el orden más alto (Figura 59).

El método de Strahler es el método de clasificación del drenaje más conocido. Sin embargo, debido a que este método sólo aumenta el orden en las confluencias del mismo orden, no tiene en cuenta todos los cursos y puede ser susceptible a la adición o remoción de cursos.

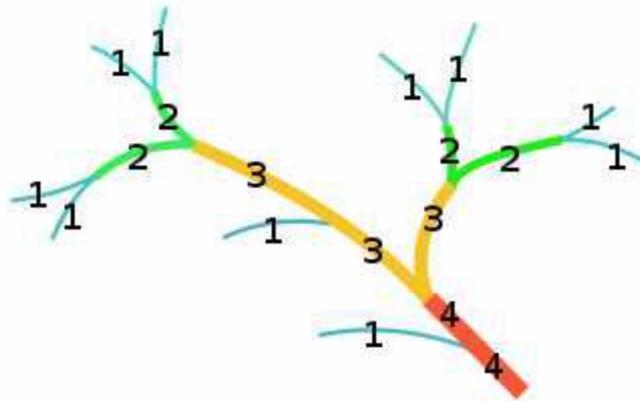


Figura 59: Esquema de orden de la red de drenaje de acuerdo con el método de Strahler.

Para su cálculo se utilizaron herramientas SIG como puede observarse en la Figura 60 y en la Figura 61 (Plano nº9 del documento 2) se presenta la ordenación de la red de drenaje en base a esta clasificación en la cuenca alta del río Jesús María, donde puede observarse que la misma es de grado 4.

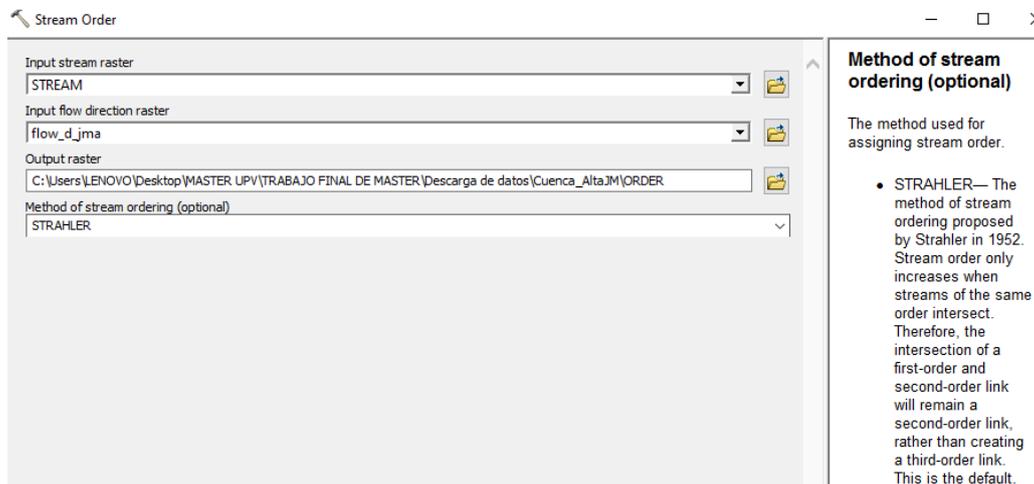
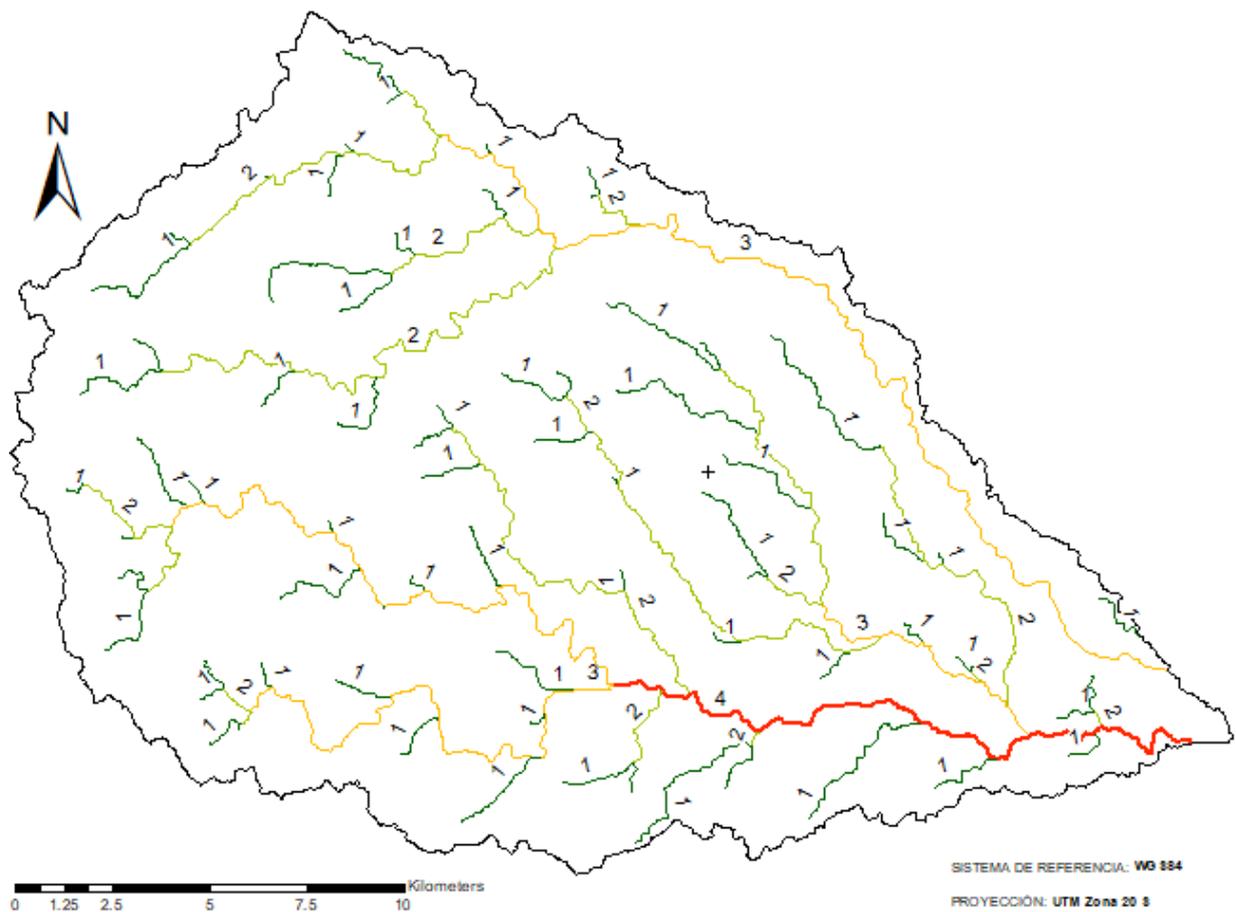


Figura 60: Orden de cursos de agua mediante el uso de Arc Gis.



*Figura 61: Ordenación de la red hídrica de la cuenca alta del río Jesús María de acuerdo con el método de Strahler.*

### 4.3. EROSIÓN HÍDRICA

La erosión es el desgaste que se origina en la superficie del suelo por la acción de agentes externos (como el viento o el agua) o por la roce continuo de otros cuerpos. La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por la acción del agua, la cual disminuye la productividad de los suelos y afecta el equilibrio de los ecosistemas. El cálculo de las pérdidas de suelo por este fenómeno es un dato de suma importancia para la planificación y toma de decisiones a diferentes niveles (Gaitán, Navarro, Tenti, et al., 2017).

La erosión hídrica es un proceso complejo de desprendimiento y remoción del material en partículas individuales y pequeños agregados por acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. Las partículas desprendidas son transportadas hacia aguas abajo por el escurrimiento superficial, lo cual causa, a su vez, el desprendimiento de



nuevo material. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento (erosión en surcos) que se mueve con una velocidad mayor y es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos (Gaitán, Navarro, Tenti, et al., 2017). Por otro lado, en regiones montañosas (ambientes de altas pendientes) la acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está saturado de agua (Michelena et al., 2014). Los movimientos en masa, deslizamientos de laderas, erosión lateral de meandros de ríos, avalanchas de nieve son ejemplos de la acción de la gravedad en procesos erosivos (Hudson, 1992).

Finalmente, cuando se produce la disminución de la energía del escurrimiento (debido a la disminución de la pendiente, presencia de obstáculos que reducen la velocidad, etc.) se origina el depósito de las partículas del suelo, lo que puede llegar a producir obstrucciones en la red de drenaje o aumento del nivel del cauce (como es el caso de la cuenca de estudio).

Se han desarrollado muchos modelos con la finalidad de determinar la erosión hídrica del suelo, siendo los modelos empíricos los que se destacan por su amplia utilización y practicidad de cálculo, de ellos el más utilizado ha sido el de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), desarrollado en Estados Unidos por Wischmeier y Smith en 1965 y modificada en 1978. Esta Ecuación fue derivada por los autores, a partir del análisis estadístico de datos obtenidos de 10.000 parcelas, afectadas por lluvia natural y entre 1.000 y 2.000 parcelas/año con lluvia simulada; la misma, evalúa principalmente la erosión laminar y la erosión en surcos en forma conjunta, no así a la erosión por escurrimiento o “flujo concentrado”, cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, 1988). La bondad del modelo depende de la exactitud con que los factores que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox et al, 1994).

La USLE considera en su modelo que el proceso erosivo de una superficie de terreno es el resultado de la interacción de factores naturales (lluvia, suelo y topografía) y del

impacto de factores influenciados por el hombre directamente (uso y manejo de la tierra) (Gaitán, Navarro, Tenti, et al., 2017).

En la República Argentina existen escasos estudios a nivel nacional sobre el estado de erosión hídrica. El primero que se tiene registro fue realizado en 1988 (Prosa, 1988). De acuerdo con este estudio, la superficie afectada por erosión hídrica en el país era, en ese momento, de 25 millones de hectáreas. En las últimas décadas Argentina ha transitado un proceso de agriculturización favorecido por la macroeconomía y la adopción de nuevas tecnologías como genética, agroquímicos y del sistema de siembra directa. Dicho impacto quedó reflejado en un estudio más reciente realizado por Casas y Albarracín en el año 2015, donde se estimaron que el 23% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica, lo cual representa 64,6 millones de hectáreas, lo que corresponde a 2,5 veces más que los estimado por Prosa en 1988 (Gaitán, Navarro, Vuegen, et al., 2017). Debido a lo antes mencionado, el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) en el año 2017 decidió actualizar la cartografía del estado de erosión hídrica actual y potencial de los suelos a escala nacional, empleando la metodología de la USLE y para ello desarrolló el software INTA USLE- RUSLE ARGENTINA, que permite calcular la erosión a escala de parcela, cuenca, provincia y país.

El modelo USLE utiliza seis factores: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y gradiente de la pendiente (LS), cubierta y manejo de cultivos (C), y prácticas de conservación (P), para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R (generalmente un año) obtenida como el producto de los factores antes mencionados:

$$A = R * K * LS * C * P$$

*Ecuación 14: Erosión hídrica actual determinada mediante modelo USLE.*

**Factor A:** es la erosión hídrica calculada por unidad de área, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente toneladas por hectárea por año ( $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ). Los tres primeros factores (R, K y LS) determinan la *Erosión Hídrica Potencial* (véase plano n°8 del Documento 2.Planos) donde se calculó para toda la cuenca del río Jesús María y véase plano n°11, donde se calculó para la cuenca alta del río Jesús María) si a estos se le agregan los factores



C y P proporcionan la *Erosión Hídrica Actual* (ver plano nº7 del Documento 2. Planos donde se calculó para toda la cuenca del río Jesús María y ver plano nº10, donde se calculó para la cuenca alta del río Jesús María).

**Factor R:** es el factor de erosividad de las lluvias, representa los factores de lluvia y escurrimiento; corresponde a un número de unidades del índice de erosión pluvial (EI), por año o en un período de tiempo considerado. Se calcula a partir de la sumatoria anual de la energía de la lluvia en cada evento ( $E_c$ ) multiplicado por su máxima intensidad en 30 minutos ( $I_{30}$ ).

$$EI_{30} = E_c * I_{30}$$

*Ecuación 15: Índice de erosividad para un evento*

$EI_{30}$  = Índice de erosividad para un evento ( $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$ )

$E_c$  = Energía cinética de la lluvia ( $MJ.ha^{-1}$ )

$I_{30}$  = Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia ( $mm. h^{-1}$ )

Con la suma de todos los  $EI_{30}$  de cada uno de los eventos del año. Se obtiene el índice de erosividad anual (R). Entonces:

$$R = \sum_{j=1}^n (EI_{30j})$$

*Ecuación 16: Erosividad de la lluvia*

En donde:

R = Erosividad de la lluvia.

n = Número de eventos durante el año

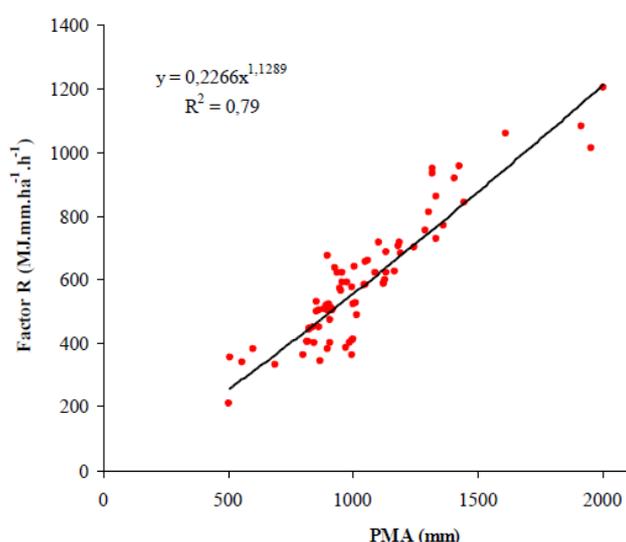
$EI_{30}$  = Índice de erosividad para un evento.

Este factor es difícil de calcular dado que para ello se necesitan registros pluviográficos confiables que no siempre están disponibles, por lo que se utilizan aproximaciones de dicho factor.

En este trabajo se aproximó el factor R a partir de la precipitación media anual (PMA) del “Atlas climático digital de la República Argentina” (Bianchi y Cravero, 2010) debido a que se encontró que la PMA es un buen estimador del factor R (Figura 62). Por tanto, se utilizó el siguiente modelo para obtener el mapa de Factor R (plano n° 4 del anexo) para toda la cuenca de estudio interpolando los valores de R, calculados con la Ecuación 17, obtenidos a partir de la PMA de estaciones más próximas a la cuenca de estudio mediante la herramienta de interpolación Kriging en el software ArcMap.

$$R = 0,2266 * PMA^{1,1289}$$

*Ecuación 17: Aproximación del Factor R.*



*Figura 62: Relación entre la precipitación media anual (PMA) y el factor de erosividad de las lluvias (R) para 75 localidades de la República Argentina. Fuente: Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina.*

**Factor K:** Para la obtención del factor K, se utilizó la metodología propuesta por Wismeier (1971) erosionabilidad del suelo que representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y que considera el porcentaje de limos más arenas finas, arenas, materia orgánica y estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo. Para poder crear el plano n° 3 *Factor K* del documento 2.Planos para toda la cuenca del río Jesús María se obtuvieron los datos de suelo de la web de la FAO<sup>4</sup> donde se encuentra el mapa de suelo del mundo.

<sup>4</sup> <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?id=14116#/home>



La ecuación utilizada para el cálculo del factor K fue determinada por Wishmeier es la siguiente:

$$100.K = 0,000271.M^{1,14} \cdot (12 - a) + 4,20.(b - 2) + 3,23.(c - 3)$$

*Ecuación 18: Ecuación de Wishmeier para la obtención del factor K.*

Donde:

**M** : es el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,1 mm de diámetro, expresado en %, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,2 mm de diámetro expresadas en %, o lo que es igual a la diferencia entre 100% y el porcentaje de arcilla de la muestra de suelo.

**a**: es el porcentaje de materia orgánica.

**b**: es el número correspondiente a la estructura del suelo.

**c**: clase de permeabilidad del perfil del suelo, según la codificación de la USDA.

### **Factor LS:**

La influencia del relieve en la erosión hídrica se expresa en la ecuación USLE a través del factor topográfico, resultante de la combinación del gradiente de la pendiente (S) con la longitud de la pendiente (L). Años atrás se utilizaban ábacos (como el que se muestra en la Figura 63) que permiten calcular la pérdida de suelo para distintos valores de S y L; a partir de los avances tecnológicos y la disponibilidad de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de la superficie terrestre, la ecuación original para el cálculo del Factor LS de Wischmeier y Smith (1978) ha sido modificada con la incorporación del impacto de la acumulación o convergencia de flujo (Moore et al. 1991, Desmet y Govers 1996).

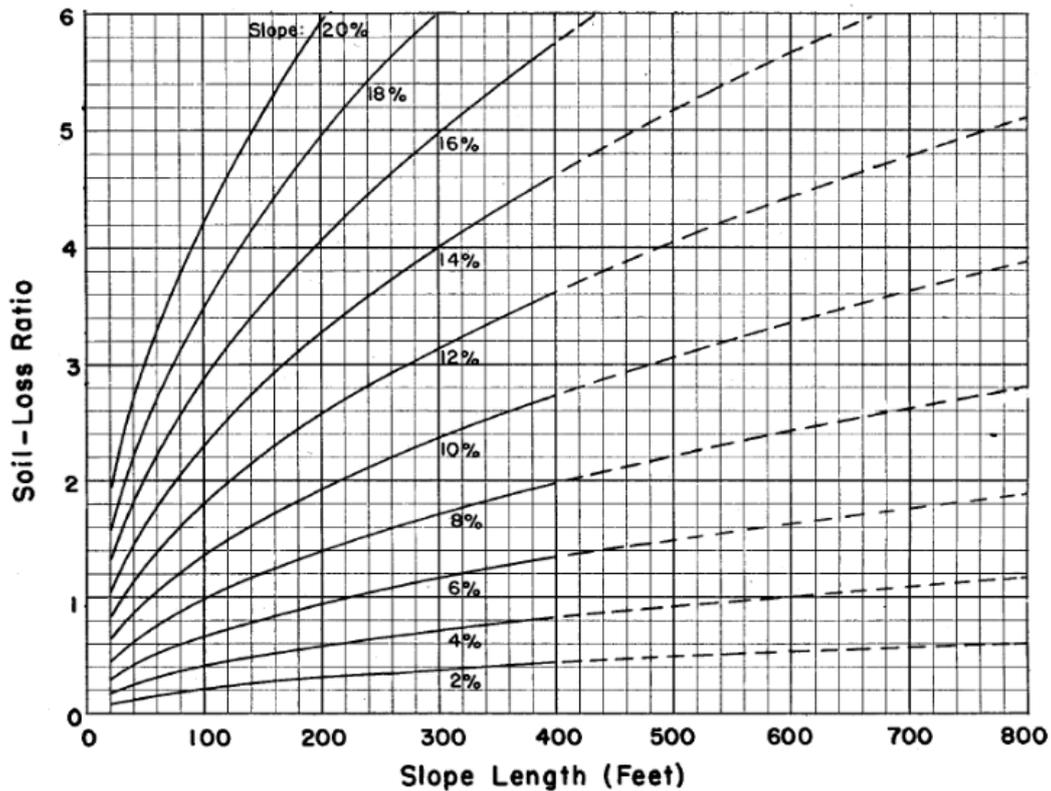


Figura 63: Efecto de la pendiente y su longitud en la pérdida de suelo por erosión hídrica (Wischmeier et al., 1965).

En este trabajo fin de máster, el método utilizado para la determinación del Factor LS fue el de Moore et al. 1991 (véase plano nº 5, documento 2). El mismo se calculó mediante el software ArcMap a partir de un MDE con resolución de 12,5 m x 12,5 m obtenido de la web de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) aplicando las siguientes ecuaciones de Moore et al. (1991):

$$L = 1,4 \cdot \frac{(As)^{0,4}}{22,13}$$

Ecuación 19: Longitud de la pendiente.

$$S = \frac{(\text{Sen}\beta)^{1,3}}{0,0896}$$

Ecuación 20: Pendiente

En donde:

As= Área de contribución específica.



$\beta$  = Ángulo de la pendiente.

### Factor C:

Para la estimación del factor C se procedió inicialmente a buscar los distintos tipos de usos de suelo de la cuenca, dicha información se encontró en la web de Mapas de Córdoba del Geoportal IDE de la Provincia de Córdoba<sup>5</sup>; allí se descargó la capa en formato Shapefile (formato compatible con el software Arcgis) con la cual se trabajó. Posteriormente se le asignó a la capa de usos de suelo un valor del factor C de acuerdo a información obtenida de distintas fuentes bibliográficas, presentaciones vistas en clases y criterio propio; de esta manera se obtuvo la Tabla 18; como se podrá observar en la misma, los valores próximos a 0 tienen la máxima protección del suelo frente a la erosión mientras que valores de 1 representan a superficies donde el suelo está completamente desprotegido frente a los fenómenos erosivos.

nº	Uso	C
1	Monte	0.01
2	Arbustales y matorrales	0.1
3	Pastizal natural	0.55
4	Pastizal natural con rocas o suelo desnudo	0.575
5	Rocas	1
6	Suelo desnudo	1
7	Salina	1
8	Cuerpos de agua	1
9	Zonas anegables	1
10	Cursos de agua	1
11	Zona urbana consolidada	0.0001
12	Zona urbana en proceso de consolidación	0.0001
13	Zona urbana sin consolidar	0.0001
14	Infraestructura vial	0.0001
15	Cultivos anuales de secano	0.3
16	cultivos regados	0.2
17	Pasturas implantadas	0.35
18	Pasturas naturales manejadas	0.35
19	Plantaciones forestales maderables	0.01
20	Plantaciones perennes (frutales) de secano	0.01
21	Plantaciones perennes (frutales) irrigadas	0.01

Tabla 18: Valores del Factor C para distintos tipos de usos de suelo.

<sup>5</sup> <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>

### **Factor P:**

El Factor P hace referencia a prácticas de manejo conservacionistas en áreas principalmente agrícolas tales como cultivos en terrazas, curvas de nivel, etc. Dado que no se cuenta con un mapa de la cuenca donde se indique que se hayan aplicado las mismas o que se evidencie su utilización (en imágenes satelitales recientes en extensiones lo suficientemente grandes que puedan influir en el control de la erosión), este factor de la ecuación USLE para el cálculo de la erosión hídrica actual no fue considerado.

#### **4.4. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

El agua subterránea es el recurso más utilizado, o el único, en muchas regiones de la Provincia de Córdoba, para suministro de agua potable, ganadería, riego, etc. Los ambientes hidrogeológicos más relevantes son el sistema acuífero fracturado en las Sierras de Córdoba (donde se encuentra el área de estudio) y el sistema acuífero sedimentario en la llanura. Las sierras constituyen un foco emisor y vital de agua, porque sustentan parcialmente el sistema subterráneo de la llanura (Cabrera & Matteoda, 2014).

Dada la variabilidad de los factores: profundidad de yacencia, espesor, granulometría y cementación de las capas sedimentarias, varían también la conductividad hidráulica (K), transmisividad (T) y almacenamiento (S) y, por tanto, la dinámica y potencialidad acuífera (Cabrera & Matteoda, 2014). Es por ello, que es fundamental un estudio específico de las masas de aguas subterráneas para conocer sus características y capacidad de suministro.

Los estudios geohidrológicos de Córdoba a escala regional estuvieron limitados por décadas y fueron restringidos a los cometidos prácticos puntuales de abastecimiento público a localidades o para la provisión a zonas rurales (Cabrera & Matteoda, 2014). Sin embargo, en los últimos años se realizaron numerosos trabajos a escala regional de temáticas hidrogeológicas particulares producto de programas de estudio o trabajos finales de doctorado.

Los cálculos de recarga de acuíferos, realizados en diversos sectores y con diferentes métodos, demuestran que las lluvias son una importante entrada de agua a los sistemas de agua subterránea de la llanura cordobesa (Blarasin et al. 2011).



Por otro lado, al analizar los balances hídricos edáficos de diferentes zonas, se ha constatado que los excesos hídricos (escurrimiento superficial más la recarga efectiva a los acuíferos) acompañan la evolución temporal general de las precipitaciones. Esto justifica los ciclos de inundaciones en grandes áreas en épocas más húmedas (por ejemplo, la zona de Mar Chiquita) y los ascensos observados en niveles freáticos en toda la provincia de Córdoba (Blarasin et al. 2003 y 2011, Aguirre 2013).

#### 4.4.1. SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LAS SIERRAS DE CÓRDOBA

Las sierras constituyen una macrounidad morfoestructural, compuesta por una sucesión de megabloques que revelan una marcada asimetría debido a la presencia de una importante escarpa de falla en el borde occidental, de rumbo meridiano. Estas características y su altitud (550 a 2.800 msnm), implican una configuración que las posiciona como en una entidad hidrológica receptora y a la vez emisora de agua, con incidencia fundamental en el sistema hidrológico subterráneo (Cabrera & Matteoda, 2014).

Los megabloques, que descienden escalonadamente hacia la llanura, exhiben una morfología que refleja una larga y compleja historia denudativa (Carignano et al. 1999, Degiovanni 2008), que aportó sedimentos a la llanura condicionando parcialmente su actual comportamiento hidrogeológico.

Las rocas ígneas y metamórficas de las sierras están drenadas por importantes ríos y gran cantidad de arroyos menores que, en general, desarrollan una red de drenaje de alta densidad, condicionada fuertemente por la presencia de fracturas y diaclasas. En conjunto, las sierras constituyen una zona receptora de precipitaciones (debido al efecto barrera que genera el cordón montañoso), de vital importancia para el funcionamiento hidrogeológico ya que la mayoría de los ríos y arroyos que la drenan se infiltran al salir de la sierra y alimentan los acuíferos de piedemonte y llanuras onduladas cercanas (Cabrera & Matteoda, 2014). Este comportamiento es característico del Río Jesús María en su cuenca media y baja, el cuál es apreciable in-situ en muchos tramos del río, en donde su caudal se infiltra en su lecho de forma completa.

#### 4.4.1.1. Acuífero en medio fracturado

El sistema de fracturas y diaclasas que poseen las rocas del basamento serrano otorga a la roca una permeabilidad o conductividad hidráulica (K) baja que varía según el grado de fracturamiento. Esta situación da origen a un sistema acuífero libre, de pobre capacidad para conducir el fluido. Para rocas similares en el mundo se han establecido valores de K de  $10^{-5}$  a 1 m/d y coeficientes de almacenamiento (S) de 0,005 a 1 % (Sanders ,1998). El agua circulante en la roca aporta al medio sedimentario alojado en los valles y, además, da lugar a manantiales, permanentes o temporarios, de escaso caudal (Cabrera & Matteoda, 2014).

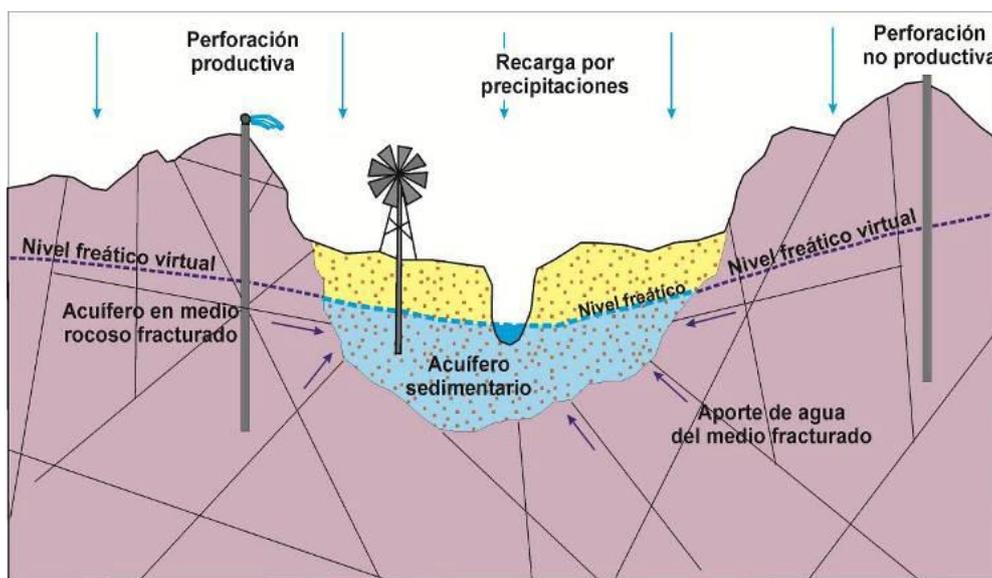


Figura 64: Esquema de relaciones hidrogeológicas entre medio fracturado y medio poroso clástico, en valles serranos. Fuente: Cabrera & Matteoda, 2014.

El agua en este tipo de acuíferos se caracteriza por ser dulce y sustenta además ríos o arroyos. Las perforaciones en roca son escasas, aunque su ejecución aumentó en los últimos años, fundamentalmente debido a mejoras tecnológicas de los sistemas de perforación. Poseen profundidades variables con un promedio de 50 m y los caudales extraídos son pequeños, en general menores a  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , los que dependen fundamentalmente del grado de diaclasamiento y fracturación del macizo rocoso (Cabrera & Matteoda, 2014).



#### 4.4.1.2. Acuíferos sedimentarios

Están constituidos por los sedimentos de edad fundamentalmente cuaternaria que rellenan los valles y se alimentan de la infiltración de precipitaciones locales y del aporte de agua de las rocas circundantes (Figura 64).

Dependiendo del tamaño del valle y de su historia geológica, los rellenos sedimentarios varían desde pocos centímetros a varias decenas de metros. Por estos motivos las  $K$  son desde bajas a moderada-altas (1-50 m/d) y hay diferentes ensambles de capas acuíferas-acuitardas. Las perforaciones existentes son de diferente porte y caudal, dependiendo de la geología local. En los valles pequeños son comunes las de 1-5 m<sup>3</sup>/h que deben ser tratadas con cuidado si se pretende preservar el recurso, debido al lento ritmo de reposición del agua subterránea desde el medio fracturado circundante (Cabrera & Matteoda, 2014). Aunque también existen en las sierras de Córdoba (fuera del área de estudio) grandes valles intermontanos como los de Calamuchita, Punilla, San Pedro Norte y Avellaneda que presentan una cubierta sedimentaria del orden de los 100 m de profundidad en donde se encuentran acuíferos semiconfinados y confinados con rendimientos variados, desde 10 m<sup>3</sup>/h hasta 150 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.4.1.3. Acuíferos en Pampa de altura

Son de escasa significación areal y poco espesor saturado, en general están compuestos por sedimentos arenosos muy finos limosos de baja conductividad hidráulica (1-2 m/d). Exceptuando casos puntuales, en general no tienen relevancia económica directa, pero actúan como zonas de recarga aportando a pequeños arroyos (Cabrera & Matteoda, 2014).

## 5. ORDENACIÓN DE LA CUENCA

### 5.1. ANTECEDENTES:

Luego de una intensa búsqueda bibliográfica y consulta a profesionales en temáticas referidas a cuencas hidrográficas se ha podido concluir que no existen antecedentes de proyectos de ordenación de la cuenca alta del río Guanuscate.

### 5.2. OBJETIVOS:

La cuenca hidrográfica del río Guanuscate como resultado de las precipitaciones torrenciales a lo largo de los años, presenta graves problemas de erosión hídrica que se pueden evidenciar fácilmente in-situ en las distintas partes de la cuenca. Por ejemplo, en la cuenca alta se puede observar suelo desnudo y rocas en superficie, en la cuenca media se evidencia en cárcavas y erosión de márgenes en los distintos cursos de agua, mientras que en la cuenca baja se refleja en problemas severos de acumulación de sedimentos que obstruyen puentes, alcantarillas y el propio cauce del río Jesús María (véase: Anexo 1 Estado actual de la cuenca dentro del Documento 1.Memoria).

La ordenación hidrológico-forestal de la cuenca consiste en una medida de tipo no estructural, que tiene la finalidad de asignar racionalmente un uso de suelo a un territorio determinado de acuerdo con las características del lugar y a los intereses de la población, teniendo en cuentas las características del medio físico (por lo cual es fundamental su estudio previo) y el previsible comportamiento ante eventos torrenciales.

Realizar una distribución racional de los usos de suelo en la cuenca permitirá un aumento generalizado en la productividad, debido a mayores rendimientos en los cultivos (dado a la conservación del estrato orgánico que suele ser el más fértil), aumento de la disponibilidad de agua (debido a una mayor infiltración), etc.

Asimismo, como consecuencia de la ordenación, se adoptan una serie de acciones a llevar a cabo con el objetivo primordial de corregir, mitigar o evitar el fenómeno erosivo hídrico y, consecuentemente, las pérdidas de suelo.

Tales medidas adoptadas en la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca, de tipo estructural (que se explicarán en el apartado 6. Restauración hidrológico -Forestal), se llevarán a cabo en la restauración hidrológico-forestal, consistentes en:



- ✚ Biotecnicas de restauración: tienen lugar tanto en los cauces como en las laderas y emplean material vegetal como base. Se Incluyen: repoblaciones forestales y tratamientos selvícolas.
- ✚ Hidrotecnicas de corrección de cauces: se realizan dentro de los cauces y emplean, como material de base, áridos, morteros u otros materiales de construcción.

### 5.3. CRITERIO DE ORDENACIÓN:

La ordenación de la cuenca consiste en cambiar aquellos usos de suelo que no son apropiados para un determinado lugar de la cuenca, para ser reemplazados por otros más aptos. Los criterios utilizados para en este trabajo son teniendo en cuenta las pérdidas de suelo o la pendiente, como se explicará a continuación.

#### 5.3.1. PÉRDIDAS DE SUELO:

Para hacer uso de este criterio fue necesario crear un mapa de erosión hídrica de la cuenca en estudio teniendo en cuenta las toneladas de suelo por hectárea al año que se pierden a causa del fenómeno torrencial (ver plano nº10, Documento 2. Planos). Se define un valor umbral ( $A_t$ ) de 11 ( $Tn/Ha/año$ ) donde para valores inferiores al mismo se mantendrán los usos de suelo actuales, pero si es superado se deberá actuar con acciones de mejora o sustitución para cada uso del suelo particular, en función de la vocación del suelo definida por este criterio en base a la siguiente tabla:

VOCACIÓN DEL SUELO	CONDICIÓN QUE DEBE CUMPLIRSE	TOLERANCIA RESPECTO A LA EROSIÓN
Forestal	$A_i < A_t$	Uso actual del suelo compatible.
	$A_i > A_t$	Uso actual del suelo incompatible (sustituir o mejorar).
Agrícola	$A_i < A_t$	Uso actual del suelo compatible
	$A_i > A_t$	Siendo $B_i$ = prácticas de conservación de suelos. Uso compatible
	$A_i * B_i < A_t$	Uso actual del suelo compatible
	$A_i > A_t$ $A_i * B_i > A_t$	Uso actual del suelo incompatible.
Improductivo	No se considera	-

Tabla 19: Criterio de ordenación de cuenca por pérdidas de suelo, según método USLE.

### 5.3.2. POR PENDIENTE.

A partir del mapa de pendientes de la cuenca en estudio (plano 13, documento 2. Planos), expresado en tanto por ciento (%). Este criterio contribuye, junto con las pérdidas de suelo, a determinar la vocación del suelo, en base a lo ilustrado en la siguiente tabla:



PENDIENTE (%)	VOCACIÓN
$\leq 10 - 12 \%$ (pendiente de inicio de erosión; empieza el arrastre del suelo, de partículas discretas)	Agrícola
Entre 10 – 12% (pendiente de inicio de erosión) y 18 – 24% (pendiente de arrastre total)	Agrícola, pero es necesario realizar prácticas de conservación de suelos
$> 18 - 24 \%$ <u>2 casos:</u> $< 30 \%$ $> 30 \%$	Forestal  Pastizales Arbolado

Tabla 20: Criterio de ordenación de cuenca por pendiente, según García Nájera.

#### 5.4. VOCACIÓN USO DE SUELO

A partir del plano de erosión hídrica actual, vegetación y de pendientes de la cuenca (plano nº7, nº12 y nº13 respectivamente, Documento 2. Planos) se analizó la vocación de la cuenca teniendo en cuenta los dos criterios anteriores de forma que, si el uso actual del suelo es compatible con su vocación, se conserva; en caso contrario, se adapta al uso futuro vocacional. De esta manera se realizó el plano nº 14 de vocación de uso del suelo dentro del Documento 2, planos.

Los planos nº7, nº12 y nº13 fueron creados mediante herramientas SIG en base a modelos digitales del terreno (MDT), extraídas de la web de la Nasa<sup>6</sup> (para el caso del plano nº7 y nº13) y los datos sobre la vegetación actual fueron obtenidos de la web de Mapas del Gobierno de la provincia de Córdoba Argentina<sup>7</sup>.

#### 5.5. ORDENACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LA CUENCA

La ordenación de la cuenca, atendiendo a los criterios antes mencionados, se ha realizado a partir de los mapas de erosión (plano nº7), de pendientes (plano nº13) y de

<sup>6</sup> <https://search.asf.alaska.edu>

<sup>7</sup> <https://www.mapascordoba.gob.ar/#>

vegetación actual Plano nº12) de la cuenca de estudio, que se muestran a continuación.

La ordenación hidrológico-forestal de la cuenca consiste en el establecimiento de una serie de medidas o actuaciones a realizar para adecuar los usos actuales de la cuenca a los usos futuros, según la vocación del suelo (plano nº14, documento 2. Planos), establecida en base a los criterios anteriormente explicados. La vocación del suelo, extraída a partir de los criterios de pérdidas de suelo y pendiente establecidos, a fin de comprobar la adecuación o no de los usos actuales del suelo a los usos futuros, de forma que, si los primeros son compatibles con los segundos, se mantendrán; en caso contrario, tendrán que adaptarse.

Las actuaciones o medidas propuestas tras la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca son las siguientes:

- ✚ Repoblación forestal, previa realización de los trabajos especificados en el Apartado 6.6. . Biotécnicas de Restauración.
- ✚ Mantenimiento y mejora del arbolado (de acuerdo con los trabajos Silvícolas detallados en el Apartado 6.6.6. )
- ✚ Prácticas de conservación de suelo (para aquellos cultivos que se mantendrán).
- ✚ Mantenimiento y mejora de Arbustales y Matorrales.

Estas medidas quedan recogidas de forma teórica en la Tabla 21, para cada caso particular, así como gráficamente, en el plano nº15, Ordenación Hidrológico-Forestal de la cuenca (dentro del Documento nº2, Planos) como resultado de la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca de estudio.

Cabe destacar que, en la información referida a vegetación, obtenida de la web del Gobierno de la Provincia de Córdoba, no se indicó sectores sin cobertura vegetal, es por ello que no se los expuso en el plano nº12. Vegetación, sin embargo, en caso de existir los mismos se procederá con las indicaciones de la Tabla 21.



PÉRDIDAS DE SUELO (T/ha/a)	VOCACIÓN	PENDIENTE (%)	VEGETACIÓN ACTUAL	MEDIDAS A ADOPTAR
<10	AGRÍCOLA	<12	CULTIVOS	Mantener cultivos con prácticas de conservación de suelo
			ARBUSTALES Y MATORRALES	Mantener los arbustales y matorrales
			MONTE	Mantener y Mejorar Arbolado
	FORESTAL	>12	ARBUSTALES Y MATORRALES	Repoblación
10 a 50	AGRÍCOLA, CON PRÁCTICAS CONSERVACIÓN	12 a 24	CULTIVOS	Mantener cultivos con prácticas de conservación de suelo
			ARBUSTALES Y MATORRALES	Repoblación
			MONTE	Mantener y Mejorar Arbolado
			SIN CUBIERTA VEGETAL	Repoblación, siempre y cuando sea viable
>50	FORESTAL	>24	CULTIVOS	Mantener cultivos con prácticas de conservación de suelo
			Si tienen prácticas de conservación de suelo se mantienen, de lo contrario se recuperarán como terrenos forestales	
		24 - 30	MATORRAL	Repoblación
		> 30	MONTE	Mantener y Mejorar Arbolado
		>24	SIN CUBIERTA VEGETAL	Repoblación, siempre y cuando sea viable

Tabla 21: Ordenación hidrológico-forestal de la cuenca del río Guanusacate.

En la plano nº15 (dentro del documento 2, Planos) de Actuaciones propuestas como consecuencia de la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca, se cartografía la distribución de usos racionales del suelo como resultado la ordenación propuesta, cuyo reparto de superficies se muestra en la Tabla 22.

MEDIDAS A ADOPTAR	Km <sup>2</sup>
Repoblación Forestal	156,5
Mantener y Mejorar Arbolado	113,5
Mantener y Mejorar Arbustales y Matorrales	71,8
Prácticas de conservación de suelo	78,8
TOTAL	420,6

*Tabla 22: Resultado de la ordenación de la cuenca y superficies por medidas a adoptar.*

## 6. RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La cuenca media y baja del río Guanuscate ha sufrido y sufre en la actualidad una gran presión del hombre debido principalmente al avance de la agricultura sobre terrenos que antes se encontraban inalterados y protegidos por cubierta vegetal. Este cambio de uso de suelo, sumado al avance de la urbanización han provocado una pérdida de infiltración en el suelo y por tanto, un aumento en las probabilidades de inundaciones; esto se puede evidenciar fácilmente en el registro de inundaciones de los últimos años, donde las pérdidas humanas y materiales tuvieron una tendencia ascendente. Por otro lado, el pronóstico no es muy alentador ya que las medidas que se están tomando son nulas o insuficientes.

Los fenómenos torrenciales comienzan a originarse en la parte alta de la cuenca, donde la cubierta vegetal es menor y las pendientes mayores, por lo que los sedimentos acarreados también lo son. Estos sedimentos proceden de la erosión, tanto de las laderas de los cauces como de su propio lecho y de otros materiales que el agua arrastra. La parte alta de la cuenca tiene una gran importancia ante estos fenómenos, de forma que cuanto menores sean los caudales líquidos y sólidos, las crecientes serán menos violentas y las pérdidas económicas y humanas menores.



## 6.2. ANTECEDENTES

Si bien no existen registros de proyectos de restauración hidrológica-forestal en la cuenca de estudio, si se han realizados acciones puntuales tendientes a controlar la erosión hídrica y regular los grandes caudales líquidos y sólidos. Entre estas acciones se puede mencionar el uso de técnicas de conservación de suelo, micro embalses de retardo y un proyecto de dique de laminación de crecidas, las cuales se explicarán a continuación:

**Técnicas de conservación de suelo:** en los últimos años se han realizado trabajos en sectores puntuales de la cuenca de estudio con la finalidad de frenar o desacelerar los procesos erosivos que producen una gran pérdida de suelo fértil. La técnica más empleada en la Córdoba es conocida con el nombre de curvas de nivel y consiste en generar en el terreno surcos sobre líneas de igual pendiente tendientes a retener caudales líquidos y sólidos no regulados. La acumulación progresiva de sedimentos sobre estas zanjas permite al cabo de pocos años disminuir la pendiente del terreno y formar terrazas (ver Figura 65). Es importante destacar que solo se ha observado el uso de esta técnica en muy pocos lugares, por lo que el efecto sobre el control de la erosión es local o puntual. Para poder apreciar cambios considerables es fundamental realizar una planificación y ordenamiento de acciones a realizar para toda la cuenca.



*Figura 65: Ejemplo de curvas de nivel en la cuenca de estudio.*

### Microembalses de retardo:

Se trata de obras hidráulicas destinadas a la laminación de caudales ejecutadas mediante un terraplén en forma de medialuna con un descargador de fondo de hormigón armado (similar a una alcantarilla de carretera). Si bien no se han encontrado registros de estas obras en la cuenca de estudio, si se han desarrollado próximo a la misma como lo demuestra la Figura 66. Al igual que en el caso anterior, estas obras solo tienen un efecto local si no se las acompaña de otras. Es por ello, que se insiste en una correcta planificación mediante un proyecto (que englobe toda la cuenca) para que su efecto sea significativo.

## REANUDAN EJECUCIÓN DE MICRO EMBALSES DE RETARDO EN LA ZONA

 Claudio Minoldo  12:05

***Solucionados los problemas sobre la cuenca norte de Sinsacate, ahora comenzaron a atacar los excesos hídricos sobre la parte sur.***

Mientras sigue la discusión sobre la conveniencia o no de ejecutar grandes obras de ingeniería para atajar el exceso de agua de la cuenca alta, la buena noticia de la semana es que se reanudaron las únicas obras que, hasta ahora, han hecho algo concreto para paliar el problema.

Esta semana comenzó la ejecución de la primera sobre tres lagunas de retardo que está planificado hacer para la parte sur de la cuenca denominada Sinsacate. Allí, vale recordar, se hicieron ocho microembalses que sirvieron para resolver los golpes de agua que venían en dirección oeste-este, pero sobre el norte de la localidad.

Ahora, están atacando la cuenca sur, la que está hacia el oeste del viejo cementerio en ruinas de la localidad.



*Figura 66: Se realizaron microembalses de retardo para paliar el efecto negativo de las crecientes.*

*Fuente: <http://www.semanarioprimordia.com.ar/2016/06/reanud-an-ejecucion-de-micro-embalses-de.html>*

### Proyecto de dique Carapé:

En el año 2016 el Gobierno de la Provincia de Córdoba presentó un proyecto para la construcción de un Dique sobre el Río Carapé (Figura 67) para poder regular dicho curso de agua y mitigar los efectos de las reiteradas crecientes repentinas. Dicho proyecto surgió como respuesta a los reclamos de los afectados por las inundaciones del fatídico 15 de febrero de 2015, en las Sierras Chicas, donde 12 personas perdieron



su vida. El relato de un periodista local deja esclarecido cual es el problema que presenta esta cuenca de manera rutinaria:

*“Domingo por la mañana y el aguacero continúa desde anoche que ahora es torrencial y un ruido poco habitual hace extraña la atmósfera pueblerina. El espectáculo es tan hipnótico como estremecedor: el estruendo rompe y un volumen de agua enloquecida embiste contra todo lo que encuentra a su paso. Hay que alejarse del puente porque empieza a temblar el suelo y los laterales de hierro están retorcidos a punto de desprenderse. Entonces comienza una carrera desesperada hacia zonas altas, porque ya no es un entretenimiento inofensivo: el agua comienza a devorarse las márgenes de los arroyos y su oleaje enardecido golpea las piernas y nos hace trastabillar y caer. Los vecinos avisan que se van, dejando la puerta abierta de su vivienda, mientras el nerviosismo se contagia casa por casa en el barrio”<sup>8</sup>*

El proyecto consistía en un dique de 20 m de altura ubicado a 1,5 km aguas arriba de la localidad de Ascochinga que permitiría regular los excesos hídricos sobre el río Carapé. Se realizó una audiencia pública para comunicar a los vecinos sobre el proyecto, pero en ella no se logró un acuerdo y tiempo después el proyecto se descartó (Figura 67).

Como paliativo el Gobierno de la Provincia de Córdoba a través de distintos organismos: como consorcios canaleros, de conservación de suelo y camineros, formados por vecinos motivados y decididos a revertir esta situación, comenzaron a ejecutar microembalses de retardo en terrenos en donde los propietarios eran concientes de la problemática.

El gran inconveniente que tienen las obras para llevarse a cabo es que su lugar de emplazamiento pertenece a terrenos privados, donde el gobierno se ve limitado a actuar pese a su voluntad. Si el proyecto se hiciese de forma integral para toda la cuenca, en donde todos los propietarios fueran partícipes y correctamente

---

<sup>8</sup> <https://periodismoambiental.com.ar/el-dia-que-fuimos-anfibios/>

informados del mismo, sería posible realizar un trabajo conjunto que permita revertir las condiciones de elevada degradación y alteración del estado natural de la cuenca hidrográfica en cuestión.

## CARAPÉ, EL DIQUE QUE NO FUE

Por Redacción Sala de Prensa Ambiental - 9 julio, 2018 - 1551

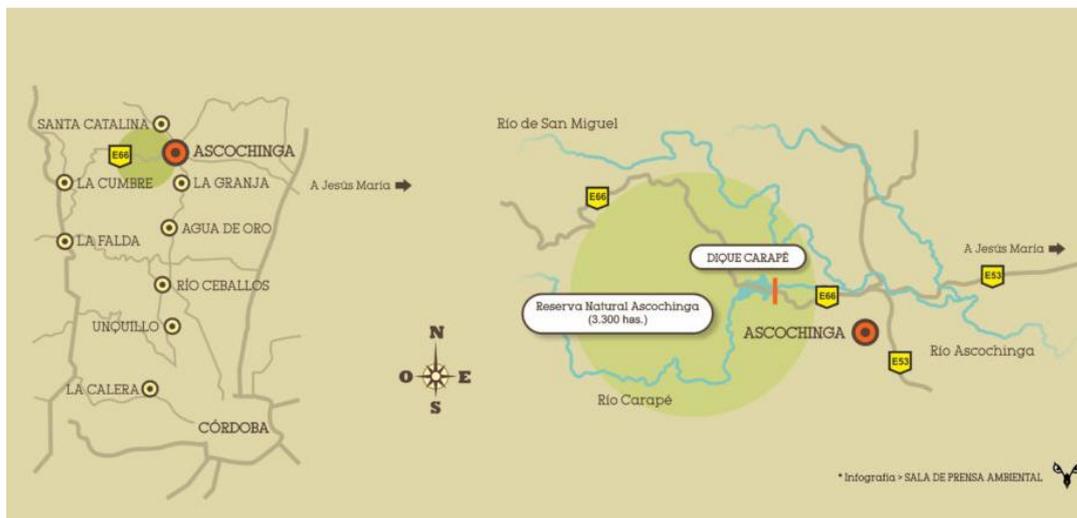


Figura 67: El gobierno de la provincia de Córdoba pretendió construir un dique sobre el río Carapé, cerca de la localidad de Ascochinga. Fuente: <https://periodismoambiental.com.ar/carape-el-dique-que-no-fue/>

Por lo tanto, aunque ya se han realizado acciones, se considera que sigue siendo necesaria la realización de trabajos adicionales de mejora de la masa forestal, junto a otras tareas, para la protección frente a fenómenos hidrológicos extremos, reducir el nivel de erosión actual de la parte alta de la cuenca y el riesgo de inundación aguas abajo; además de prevenir incendios forestales, mediante los tratamientos selvícolas de la masa forestal existente, etc.

### 6.3. OBJETIVOS

Como se mencionó con anterioridad, el principal problema de la cuenca del Río Jesús María es la elevada erosión hídrica, debido a diversos factores ya mencionados, pero principalmente debido a las altas pendientes y la falta de cubierta vegetal, lo que hace aumentar los caudales líquidos y sólidos. Esto último trae aparejado gran cantidad de problemas, pero los principales en la cuenca del río Guanusacate son las inundaciones violentas y repentinas que provocan grandes pérdidas económicas y



humanas, exceso de sedimentos acumulados en la red de drenaje media y baja, lo que hace que se requieran cuantiosos gastos de mantenimiento para evitar su colapso. Esta elevada erosión provoca el arrastre de las primeras capas del suelo, que se caracteriza por ser la más fértil, por lo que los rendimientos de los cultivos decrecen.

Esta problemática se va haciendo más severa año tras año por la recurrencia de incendios forestales, en muchos casos, difíciles de extinguir debido a la precaria accesibilidad a los focos de incendios, escasa presencia de infraestructura para la extinción de los mismos y la falta de tratamientos selvícolas de la masa forestal existente. Esta situación queda puesta en evidencia con los incendios ocurridos en el mes de octubre y noviembre de 2020 en la cuenca alta del río Jesús María (Figura 68) donde debido a condiciones climáticas adversas: baja humedad del suelo, altas temperaturas (superiores a los 33°C) y corrientes de aire seco de moderados a fuertes del sector norte, produjeron grandes pérdidas de vegetación, en especial de bosques nativos y pastizales.



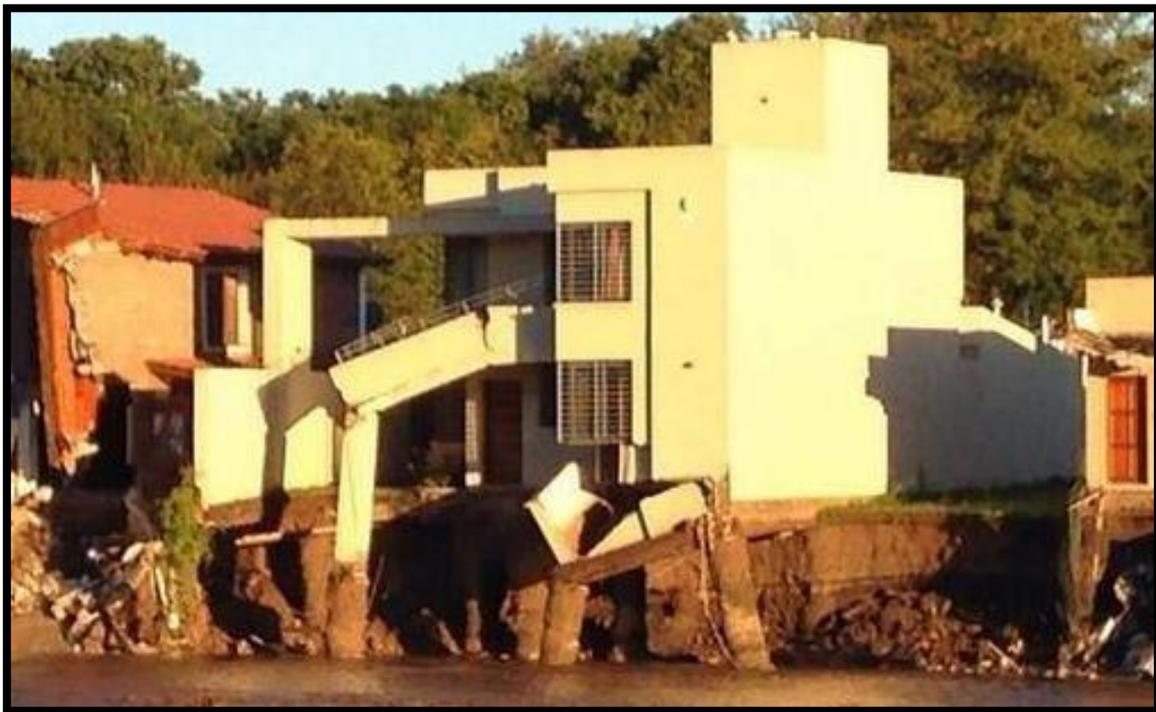
Figura 68: Incendios en la cuenca alta del río Guanusacate. Fuente:

<http://radiojesusmaria.com.ar/2020/10/19/bomberos-combaten-focos-en-varios-puntos-de-las-sierras-la-situacion-a-esta-hora/>

Los reiterados incendios, junto a los fenómenos torrenciales han provocado una denudación y arrastre de la capa superficial del suelo, quedando incluso en algunas

zonas, la roca al descubierto. Debido a este carácter torrencial de la cuenca y a su elevado grado de impermeabilidad, se producen violentas avenidas en la parte baja de la misma, la cual, al encontrarse densamente poblada por el hombre, producen cuantiosas pérdidas materiales y de vidas.

Como se comentó en el apartado anterior, en el año 2015 se produjo una de las inundaciones más grandes registradas hasta la fecha, donde el río Jesús María, en su paso por la localidad homónima, dejó luego de la crecida un saldo de 150 personas evacuadas por anegamientos de sus viviendas (Figura 69) e interrupción del tránsito en las vías de comunicación con localidades vecinas debido al colapso del estribo y losa de acceso al puente sobre Ruta Nacional nº9 (Figura 70 y Figura 71).



*Figura 69: Estado de algunas viviendas en la Ciudad de Jesús María luego de las fuertes crecidas en el río Guanusacate en el año 2015. Fuente: Diario La Voz del Interior.*



Figura 70: Estado de algunas viviendas y márgenes del río Jesús María luego de las fuertes crecidas del año 2015. Fuente: Diario La Voz del Interior.



Figura 71: Rotura del estribo y losa de acceso al puente en ruta Nacional n°9 que vincula Jesús María con Sinsacate. Fuente: <https://www.conclusion.com.ar/info-general/mas-danos-al-puente-que-une-jesus-maria-y-sinsacate/02/2015/>

El objetivo general que se persigue es la aplicación de medidas para la defensa del suelo contra la erosión, lo que posibilita, a su vez, la consecución de una serie de

objetivos concretos, estrechamente interrelacionados entre sí, como los que se enumeran a continuación:

- ✓ Prevención frente a estos fenómenos hidrológicos extremos con la finalidad de reducir el riesgo de inundación.
- ✓ Protección y uso sustentable de los recursos hídricos.
- ✓ Consolidación de cauces y laderas, conteniendo el arrastre de sedimentos y suelos de la escorrentía, es decir, disminuyendo la erosión hídrica en sus diversas formas.
- ✓ Incremento de la densidad y superficie de cubierta vegetal (masas forestales, arbustales, matorrales, etc.), lo que conlleva beneficios, tanto hidrológicos, como de producción, ecológicos y paisajísticos. Además, la misma juega un papel fundamental para el control de la erosión superficial y la escorrentía.
- ✓ Disminución del riesgo de inicio y propagación de incendios forestales.
- ✓ Aumento de la infiltración con la mejora de la calidad de aguas de los acuíferos por el *efecto de filtro* que realiza la vegetación.
- ✓ Enriquecimiento del paisaje y aumento del empleo de un gran porcentaje de mano de obra rural, tanto en la ejecución directa de las actuaciones como las que se pueden desarrollar por la mejora medioambiental conseguida (ocio, turismo rural, etc.).
- ✓ Conservación, protección y recuperación de la estabilidad y fertilidad de los suelos, sobre todo, en cabecera, que posibilite el asentamiento de una cubierta vegetal protectora eficaz de defensa frente a la desertificación, las sequías e inundaciones.
- ✓ Conservación y recuperación de la biodiversidad debido a la restauración y creación de nuevos hábitats.

Las actuaciones de restauración hidrológico forestal a desarrollar en este estudio se dividen en 2 grupos:

- ✚ **Biotecnias de restauración forestal:** se considera una acción imprescindible en la restauración hidrológico forestal para la lucha contra la deforestación y conservación de la cubierta vegetales tendientes a conservar y proteger el suelo. Incluyen:



A- **Repoblación forestal** con especies autóctonas y protectoras del suelo, con la que se procura conseguir una mejora de la capacidad de infiltración del agua y minimizar las pérdidas de suelo por erosión hídrica.

B- **Ejecución de tratamientos selvícolas** como: podas, clareos, desbroces, etc. sobre la masa forestal existente. Con estas acciones se permitirá reducir el riesgo de incendio y su propagación, mejorar las condiciones previas de establecimiento de la repoblación, disminuir el riesgo de plagas y enfermedades, facilitar la plantación y evitar competencias entre la vegetación, acelerando el paso al estrato arbóreo de la misma.

✚ **Hidrotecnias de corrección de cauces:** se consideran trabajos complementarios a las biotécnicas y de gran importancia en la restauración hidrológico-forestal, para la lucha contra el proceso de erosión y otros ocasionados por el fenómeno torrencial. Este último origina caudales líquidos muy elevados, los cuales, junto a los sedimentos y acarreos provenientes de la erosión de las laderas de la cuenca y de los propios cauces, provocan considerables daños en las zonas bajas de la cuenca. Las hidrotecnias tienen un efecto inmediato en la restauración Hidrológico-Forestal, es decir, que ni bien se terminan de ejecutar comienzan a cumplir su función, a diferencia de las repoblaciones forestales que demoran varios años (dependiendo del crecimiento de la especie) en comenzar a brindar protección frente a la erosión. Es por lo antes mencionado que es necesario combinar las hidrotecnias con las biotecnias para un óptimo progreso de la restauración de la cuenca. Estas incluyen:

A- **Diques de cierre:** son obras transversales al cauce (con altura superior a los 3 m.), situados preferiblemente en la garganta (o canal de desagüe, Figura 72) de los cauces torrenciales, donde su objetivo principal es controlar y minimizar la erosión en el lecho y márgenes del cauce, evitando la incorporación de caudales sólidos a la corriente de agua.

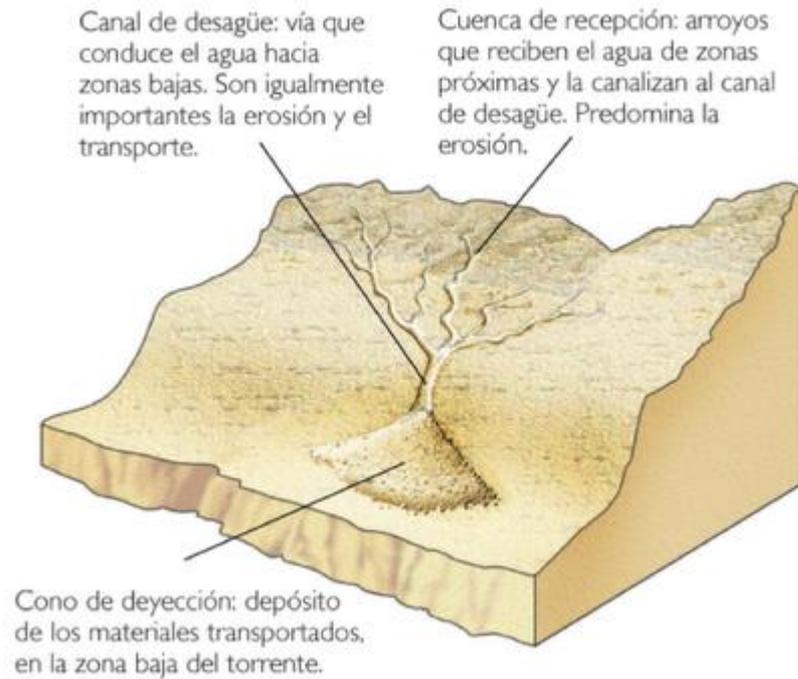


Figura 72: Partes de una cuenca torrencial.

Entre las funciones de estos, se destacan:

- Elevación del cauce que se produce por efecto del aterramiento progresivo, que permite consolidar las laderas, con la consecuente disminución de: la pendiente, hasta alcanzar la pendiente de compensación o de equilibrio entre la tensión tractiva del agua (Ecuación 21) y la tensión límite o crítica de arrastre de los materiales;

$$\tau = \gamma.R.I$$

Ecuación 21: Tensión tractiva ( $t.m^{-2}$ ), donde  $\gamma$  es el peso específico de agua ( $t.m^{-3}$ ),  $R$  es el radio hidráulico de una sección ( $m$ ) e  $I$  es la pendiente del cauce( $m/m$ ).

- Disminución del radio hidráulico (Ecuación 22), debido a lo mencionado anteriormente;

$$R = \frac{A}{P}$$

Ecuación 22: Radio hidráulico.



- Disminución del peso específico del agua, ya que el dique provoca una disminución de la velocidad del flujo, aumentando la sedimentación aguas arriba del mismo (por lo que el caudal de vertido ve disminuido su proporción sólida y, por tanto, su peso específico). Con todo ello se consigue disminuir la tensión tractiva o de arrastre de sedimentos y, por consiguiente, la erosión.
- Sirven además, para retener los caudales líquidos (laminación de caudales) y aminorar la gran energía de las avenidas.

**B- Albarradas:** Las albarradas son obras que se ejecutan transversales a los cursos de agua, de pequeña altura (menor a los 3 m), generalmente de mampostería en seco o gavionada, que se suelen emplear en conjunto para aumentar la efectividad de las mismas.

Se utilizan normalmente de apoyo al dique principal, situándose aguas arriba del mismo, en la cuenca de recepción (o cabecera, Figura 72 ) de las cuencas torrenciales.

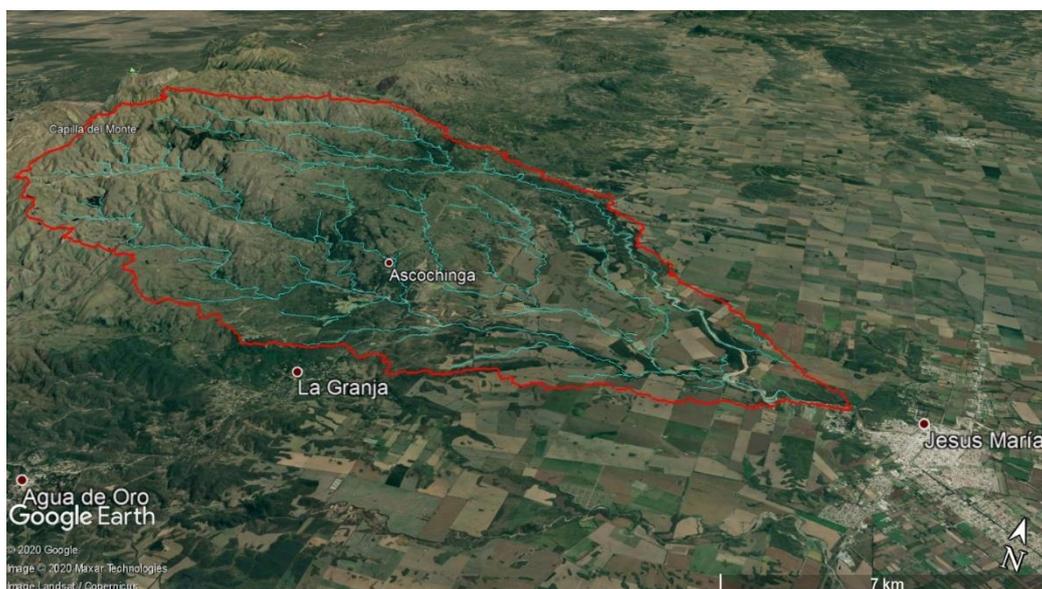
En zonas con procesos erosivos avanzados, se utilizan también para estabilizar cárcavas, junto con otras acciones biológicas.

En el plano nº18 se plantea la ubicación de estas obras, es decir, su emplazamiento en aquellos puntos de los cauces donde se considere necesario, y no su diseño, que sería objeto de un proyecto más amplio, complementario al presente trabajo.

Para su emplazamiento se han utilizado los planos ya elaborados de erosión hídrica actual de la cuenca alta del río Guanuscate (plano nº10 del documento 2, Planos) y el uso de la herramienta Google Earth Pro (Figura 73) para determinar de manera precisa la ubicación de las albarradas y así maximizar la eficiencia de estas obras para el control de la erosión hídrica. El criterio para la definición de la ubicación de las albarradas fue:

- Las mismas se deberán ubicar preferiblemente aguas abajo de áreas de gran erosión hídrica para poder captar el arrastre de sedimentos y estabilizar los procesos erosivos en cauces y laderas.

- Las albardadas se ubicarán en tramos estrechos de los cursos de agua para facilitar su ejecución y minimizar la cantidad de materiales para su construcción.



*Figura 73: Cuenca alta del Río Guanusacate con sus cursos de agua.*

## 6.4. ESTADO LEGAL

### 6.4.1. Nivel Nacional

A nivel nacional, la ley que regula el uso de los bosques es la Ley 26.331 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos, o Ley de Bosque Nativo, la misma fue sancionada el 21 de septiembre de 2007 por el Congreso de la Nación Argentina. La ley tiene como objetivos reducir la deforestación en Argentina, la conservación de los bosques nativos, la regulación y gestión responsable del uso forestal, y la promoción del manejo sostenible de los bosques. Para ello, la ley determina categorías de conservación de los bosques, crea un fondo fiduciario destinado a la conservación y promoción de manejo responsable de los bosques bajo un modelo de pago por servicios ambientales, y establece autoridades de aplicación cuyo mandato es elaborar datos para monitorear el estado de conservación de los bosques nativos, en coordinación con las provincias. La misma fue reglamentada mediante el Decreto 91/2009 en febrero de 2009 por el Poder Ejecutivo. A partir de esta ley es que se crea a la Comisión de Ordenamiento Territorial del Bosque Nativo (COTBN) la cual tiene como principal objetivo el ordenamiento territorial de los bosques nativos de la provincia de Córdoba.



La reglamentación nacional define al ordenamiento territorial como un instrumento de gestión para zonificar territorialmente el área de los bosques nativos existentes en cada jurisdicción, de acuerdo con las diferentes categorías de conservación. Es decir, se trata de determinar en qué zonas de la provincia el bosque debe ser fuertemente protegido (zona roja), manejado de manera sustentable (zona amarilla), o permitido incluso el cambio de uso de suelo (zona verde), ver Figura 74.

En octubre de 2009, la propuesta de la COTBN de Ordenación (Figura 74) comienza a ser tratada en la Legislatura de la Provincia de Córdoba, culminando con la publicación de la ley N°9.814 por el Gobernador de la Provincia de Córdoba, Juan Schiaretti, en agosto de 2010.

#### 6.4.2. Nivel Provincial

Como se mencionó anteriormente, a nivel provincial la ley que regula el uso de los bosques es La Ley 9.814 del año 2010 y tiene por objeto, como lo establece su prólogo, *“actuar en todos los bosques nativos existentes en el territorio provincial, cualquiera sea su origen, así como todos los que se formaren en el futuro”*. Estas disposiciones tienen por finalidad promover la conservación del bosque nativo mediante el Ordenamiento Territorial de los Bosques y es reglamentada mediante el decreto Decreto N° 170/11.

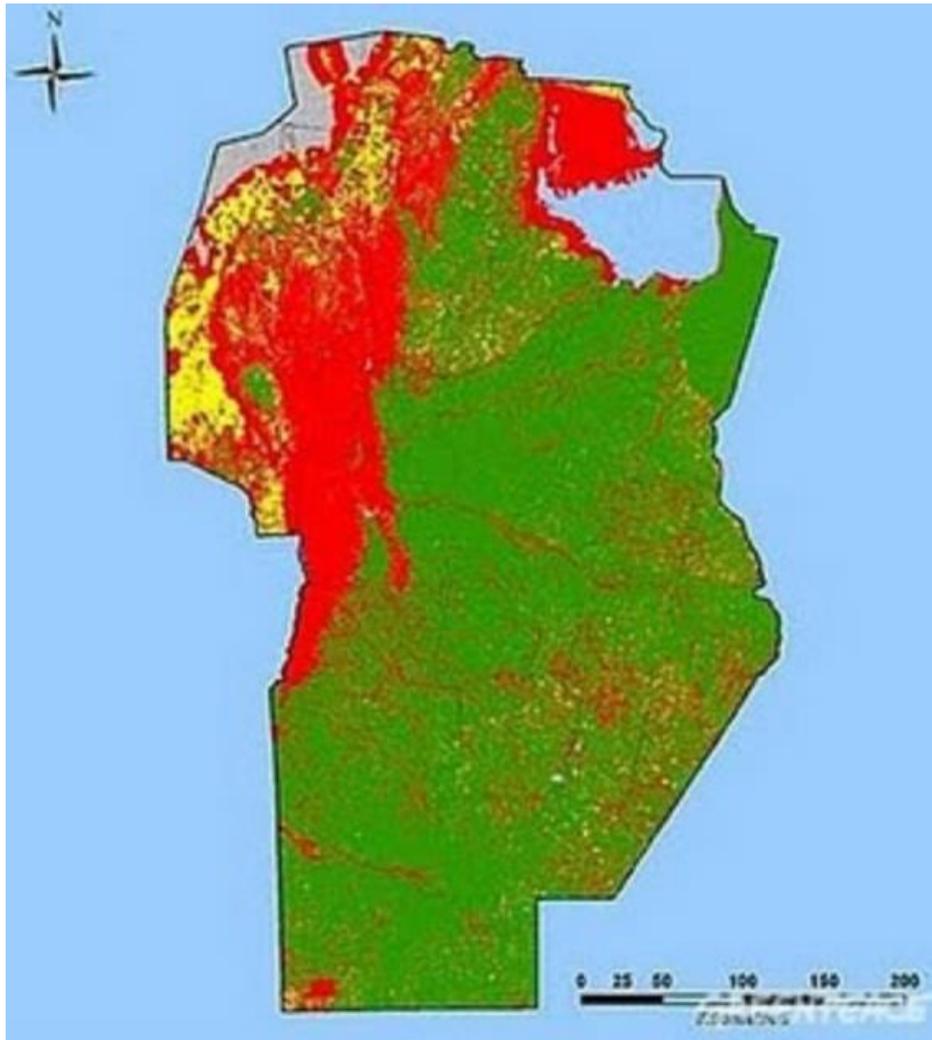


Figura 74: Mapa de ordenación territorial creado por el COTBN. Fuente: <https://sites.google.com/site/leydebosquescordoba/el-proyecto-de-la-cotbn>

## 6.5. MORFOLOGÍA

### 6.5.1. RELIEVE

La cuenca alta del río Guanusacate (subdividida en el *ESTUDIO GEO-HIDROLÓGICO DEL RÍO GUANUSACATE ENSU PASO POR EL ÁREA URBANA DE JESÚS MARÍA* en tres subcuencas: Santa Catalina, Ascochinga y Piedemonte) presenta un relieve que varía de plano a muy escarpado, con características diferenciales en cuanto a desarrollo areal y distribución (Figura 75 y Figura 76). Además, ver los planos N°13 (pendientes) y N°16 (elevaciones) del Documento 2, Planos.

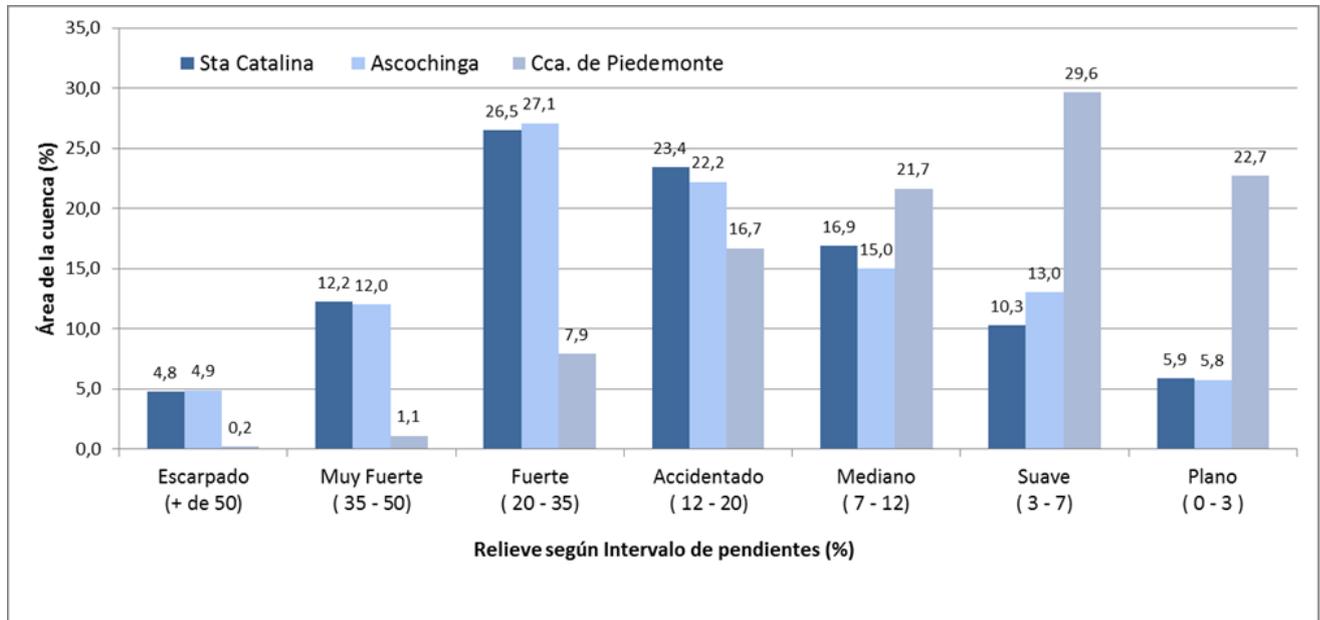


Figura 75: Clasificación del Relieve. Fuente: INA CIRSA.

Del análisis de clasificación del relieve en función de las pendientes (%), morfología y frecuencias altimétricas, se evidencia que el 66 % del área de las cuencas de los ríos Santa Catalina y Ascochinga cuenta con un relieve accidentado a escarpado (pendientes entre 12% a más del 50%), desarrollado por encima de los 900 msnm. Mientras que la cuenca de piedemonte tributaria del río Ascochinga, presenta un relieve medio a plano (pendientes entre 0% a 12%) en el 74% del área de su cuenca desarrollado por debajo de los 800msnm.

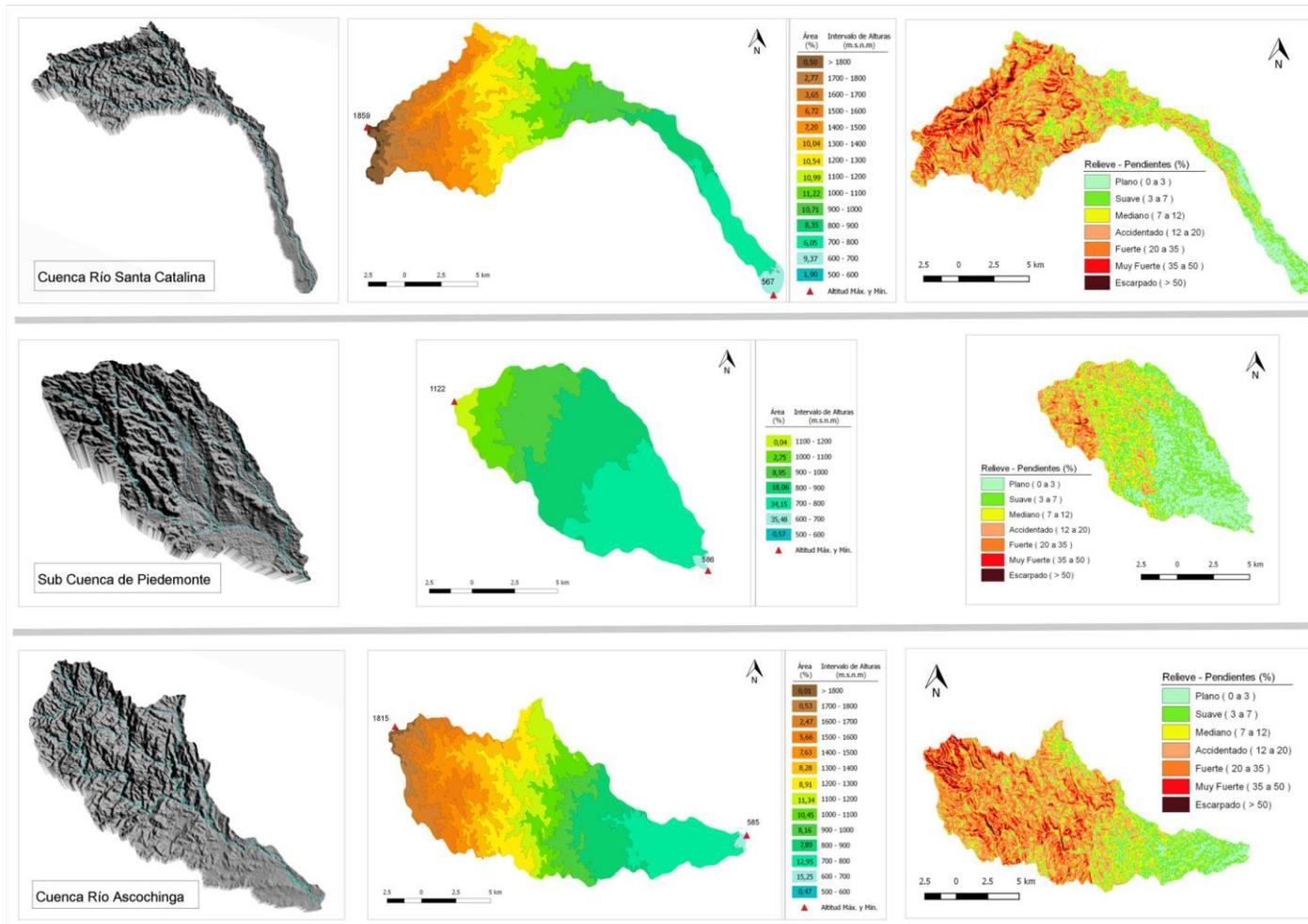


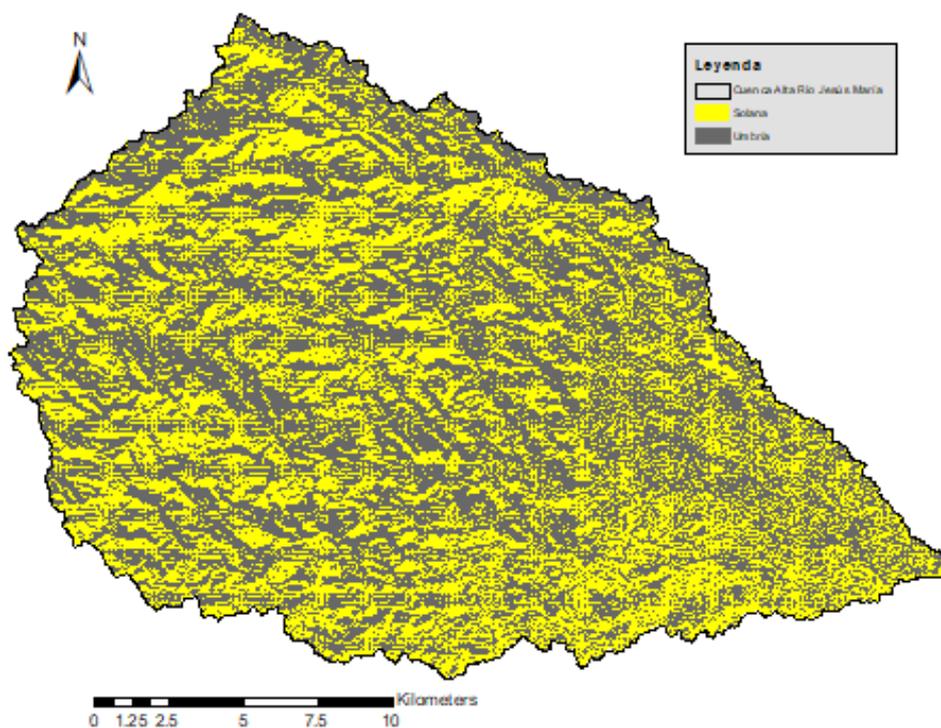
Figura 76: Caracterización comparativa del Relieve por Cuenca. alturas y pendientes (%). Fuente: INA CIRSA.

## 6.5.2. ESTUDIO DE EXPOSICIONES

Las orientaciones existentes en la zona de estudio se han clasificado según dos tipos de exposición: solana y umbría. La definición de estas orientaciones está en función de los grados, correspondiendo el Norte con el valor  $0^{\circ}$ , Este con  $90^{\circ}$ , Sur con  $180^{\circ}$  y Oeste con  $270^{\circ}$ , donde:

- Umbría:  $90^{\circ}$  a  $270^{\circ}$
- Solana:  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  y  $270^{\circ}$  a  $360^{\circ}$

La representación cartográfica de las exposiciones constituye el Plano N°17 (Exposición Solar) recogido en el Documento 2, Planos. En la zona de trabajo, la principal exposición es de umbría, aunque las proporciones entre las dos son muy similares como se puede apreciar en la Figura 77.



*Figura 77: Exposición solar en la cuenca alta del río Jesús María.*

## 6.6. BIOTECNIAS DE RESTAURACIÓN

Las biotecnias de restauración forestal propuestas en este trabajo son las que se muestran a continuación:

- Repoblación forestal: conjunto de trabajos que tienen la finalidad de formar una cubierta vegetal, normalmente arbórea y con carácter permanente, en terrenos desprovistos total o parcialmente de ella.
- Tratamientos selvícolas de las masas existentes (podas, clareos, desbroces, etc.) de defensa contra posibles futuros incendios, plagas y enfermedades, así como para facilitar la plantación y luego el mantenimiento de la masa forestal.

La preparación del suelo será puntual dado a la elevada pedregosidad que dificulta hacer un trabajo mecanizado de toda la superficie. La maquinaria a utilizar será retroexcavadora o retro pala cuando la pendiente del terreno lo permita, cuando esta última sea muy elevada se utilizará retro arañas o de forma manual, realizando hoyos de 50x50x50 cm distribuidos aleatoriamente para evitar la continuidad y buscar la naturalidad del ambiente.

La época óptima para realizar la plantación será desde mayo a agosto, periodo en el que la planta se encuentra a savia parada, lo que quiere decir es que la planta durante estos meses (de menor temperatura) se encuentran menos receptivas y por ende con mayor aptitud de sobrevivir al trasplante. Por otro lado, es importante realizar la plantación cuando el suelo tenga tempero, es decir, que reúna las condiciones idóneas de humedad. No se plantará en periodos de heladas, ni con vientos fuertes. Se incluirá aporte de hidrogel a la planta para optimizar al máximo el agua precipitada y evitar grandes pérdidas por percolación profunda.

Se realizará rebalseta para la retención de agua y aumento de la infiltración, además se protegerá la planta mediante tubo protector transparente (para que no impida el paso de la luz y genere un microclima óptimo para el desarrollo de la plántula) y castillete de piedras para una protección adicional a la técnica antes mencionada. Ambos cuidados culturales posibilitan también brindarles a las plántulas protección contra roedores y otras especies herbívoras.

#### 6.6.1. DEFINICIÓN DE UNIDADES DE ACTUACIÓN

Para decidir qué unidades de actuación implementar se utilizó la cartografía de vegetación digital suministrada por el Gobierno de la Provincia de Córdoba que provee



mediante su web<sup>9</sup>, entre otras capas, las referentes a: información de la vegetación actual, usos de suelo, áreas protegidas y regiones naturales, etc. Se ha utilizado también la cartografía realizada para la ordenación de la cuenca (Ver Plano nº15, Ordenación Hidrológico-Forestal de la cuenca) para llevar a cabo la restauración Hidrológico-Forestal.

Posteriormente mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han combinado ambos mapas obteniéndose así la superficie de la cuenca donde se llevarán a cabo las biotécnicas de restauración.

Con todo ello, la superficie afectada por los trabajos biológicos de repoblación, dentro de la cuenca alta del río Guanusacate, se eleva a 156,5 km<sup>2</sup>; la dedicada a conservación y mejora de la masa forestal arbolada ya existente es de 113,5 km<sup>2</sup>; y aquella dedicada a conservación de arbustales y matorrales, de 71,8 km<sup>2</sup> (de acuerdo con el resultado de la ordenación hidrológica-forestal de la cuenca).

#### 6.6.2. DEFINICIÓN DE ESPECIES A IMPLEMENTAR

Una vez analizado y caracterizado el medio en donde se llevará a cabo la repoblación forestal y definidos los objetivos de la misma, que serán con fines protectores (para aminorar la erosión hídrica), se procederá a la elección de especies.

La elección de especies se fundamenta en un profundo estudio del medio en el que se va a trabajar y de las necesidades de las especies frente a este medio. De esta manera, se pueden conocer cuáles serán las especies que mejor se adapten a la zona de intervención.

Las especies seleccionadas para la repoblación dentro de las nativas, mencionadas en el apartado 3.8.1. son el *molle*, el *coco*, el *algarrobo blanco y negro*, el *tala*, el *espinillo*, el *chañar* y el *garabato*. Se hizo hincapié en las especies autóctonas ya que las mismas al estar adaptadas a las condiciones del lugar de estudio permiten aumentar las probabilidades de éxito de la repoblación. Por otro lado, se ha descartado al quebracho blanco debido a su problema para arraigarse; también

---

<sup>9</sup> <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>

debido a que su hábitat idóneo se encuentra por debajo de los 500 msnm y la cota más baja de la cuenca de estudio es 574 msnm.

La planta entregada por el vivero debe cumplir una serie de exigencias que garanticen su supervivencia, debiendo considerarse especialmente el origen de la semilla que se ha empleado y las características morfológicas externas de la planta para aumentar las posibilidades de éxito de la repoblación que deberá desarrollarse en un ambiente con condiciones limitadas y adversas para el desarrollo de las plántulas.

En cuencas torrenciales, en donde se producen caudales líquidos y sólidos de importancia, como es el caso de la cuenca analizada, es usual actuar en laderas de topografía abrupta, con poca profundidad de suelo y roca desnuda; además, los regímenes de lluvia son irregulares, lo que limitan el crecimiento de especies hidrófilas, lo cual obliga a elegir especies xerófilas y de temperamento más robusto para que las plántulas puedan afrontar estas condiciones y puedan crecer, para brindar al suelo protección frente a la erosión.

Las especies del género *Pinus* debido principalmente a su rápido crecimiento favorecen la creación de un ecoclima menos xerófilo, que permitirá la introducción de las especies de crecimiento más lento y con mayores dificultades para su establecimiento en una segunda fase de la restauración.

Estudios realizados próximos a la zona de estudio demostraron que especies del género *Pinus* han tenido un excelente comportamiento, principalmente el Pino ellioti (*Pinus ellioti*) y el Pino taeda (*Pinus taeda*). A estos se pueden sumar el Pino radiata (*Pinus radiata*), el Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) y el Pino pátula (*Pinus patula*), entre otros, que en ciertas circunstancias manifiestan buen comportamiento y adaptación (diversas altitudes, suelos, exposiciones, etc.). En zonas de barranco y umbría, el objetivo es incrementar la biodiversidad, completando espesura con frondosas (como las especies nativas mencionadas en el apartado 3.8.1. ).

Una vez elegidas las especies más apropiadas, hay que tener en cuenta dos aspectos que se oponen uno al otro. En primer lugar, hay que procurar contar con una buena diversificación de especies, esto permite tener una mayor biodiversidad, un mayor aprovechamiento de los diferentes biotopos<sup>10</sup> del monte, una mayor seguridad fitosanitaria y protección contra los incendios forestales, lo que conlleva a un aumento

---

<sup>10</sup> Es un área de condiciones ambientales uniformes que provee espacio vital a un conjunto de flora y fauna.



en las probabilidades de éxito de la repoblación. Por otro lado, una cantidad excesiva de especies a implementar dificultará los trabajos, y podría constituir un problema a la hora de conseguir las diferentes semillas, incrementando además los costes para dicho propósito.

#### 6.6.2.1. Descripción de especies de pinos para la repoblación

##### 1. Pino ellioti (*Pinus elliotii*)

Pino ellioti (*Pinus elliotii*). Es una conífera de la familia de las pináceas, la cual es originaria del sureste de Estados Unidos: de Carolina del Norte y Sur a Mississippi, al sur de los Cayos de Florida. Es de rápido crecimiento, y no vive mucho para los estándares de los pinos (más de 200 años). Si bien prefiere climas y suelos húmedos tiene gran capacidad de adaptación a climas más secos.

Este árbol alcanza alturas de 18-30 m con un diámetro de tronco de 60-80 cm. Las hojas son aguzadas (como agujas muy finas) en grupos de dos o tres, y de 18-24 cm de longitud. Los conos o piñas son redondeados rojo-pardo, de 5-15 cm en longitud con un corto (2-3 mm) pedúnculo.

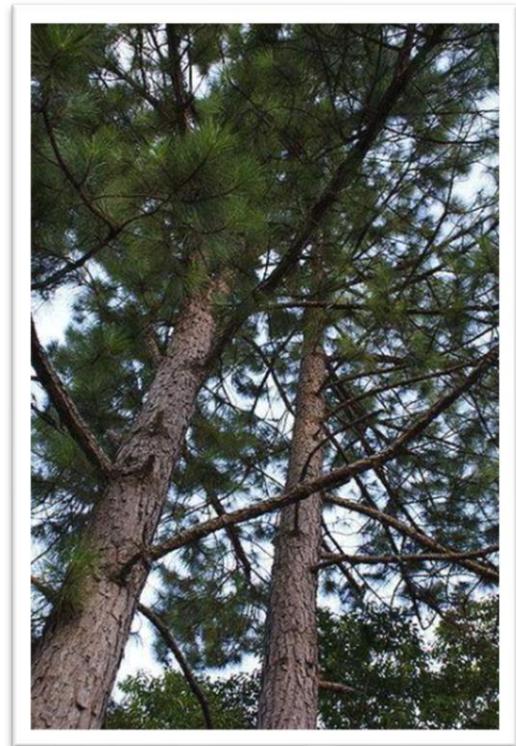


Figura 78: Pino ellioti (*Pinus elliotii*).

2. **Pino taeda (*Pinus taeda*)** *Pinus taeda* es originario del sudeste de Estados Unidos, desde el este de Texas y centro de Florida hasta el sur de Nueva Jersey, entre los 28 y 39° de latitud norte (Hampel, 2005). El clima en esa región es cálido-húmedo con temperaturas medias de 13 a 24°C y precipitaciones de 1.020 a 1.520 mm.

Se desarrolla en suelos de características variables, sin embargo, se adapta mejor a los profundos y de buen drenaje. Su requerimiento de fertilidad es mínimo y en relación con la acidez es recomendable la gama de suelos con pH de entre 4,5 y 5,5. Poseen una copa densa y piramidal con ramas inclinadas hacia abajo. Raíz principal con desarrollo moderado y extenso sistema de raíces laterales. La corteza es de color castaño rojiza a canela, gruesa y con profundas hendiduras. Son árboles de gran porte que pueden llegar a una altura de 30 a 35 m, registrándose ejemplares excepcionales de 45 m de altura.

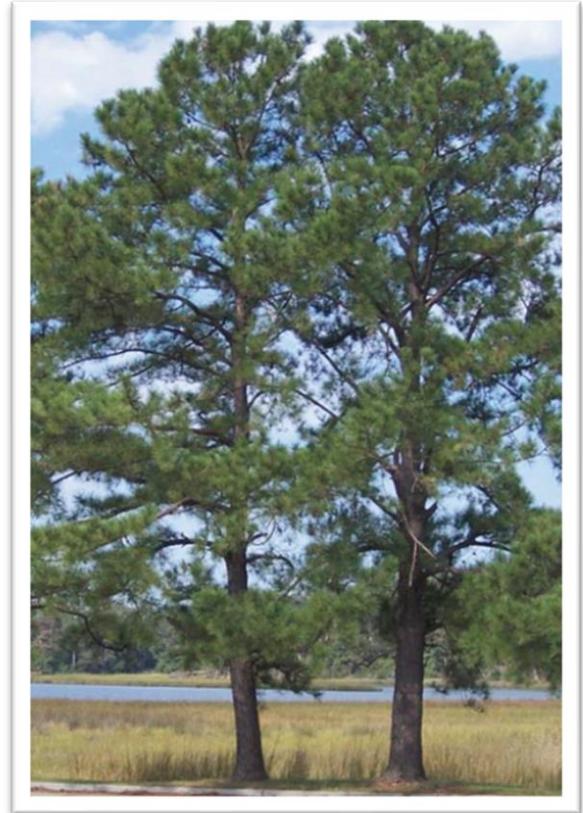


Figura 79: Pino taeda (*Pinus taeda*)

Fue introducido en Argentina a finales de la década de 1940. Se cultiva en la región litoral, desde la provincia de Buenos Aires hasta Misiones. Se han realizado plantaciones también en los valles de las sierras de Córdoba y en Tucumán.

Distintas instituciones como el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales (CIEF) y empresas privadas llevan a cabo programas de mejoramiento genético de *Pinus taeda* L. A través del programa que lleva adelante el INTA se establecieron huertos semilleros clonales que abastecen con semilla para cubrir en la actualidad entre el 25 y el 30 % de la superficie implantada con esta especie.



### 3. Pino radiata (*Pinus radiata*)

El pino radiata o pino insigne es una especie arbórea perteneciente a la familia de las pináceas, género *Pinus*, originaria del suroeste de los Estados Unidos, principalmente California. Es un árbol de talla media a alta, que puede alcanzar hasta los 50 metros de altura, aunque en no suele superar los 30 m. La ventaja que presenta para repoblaciones forestales es que es una especie de crecimiento rápido y puede alcanzar un diámetro de tronco de más de 50 cm en 20 años.

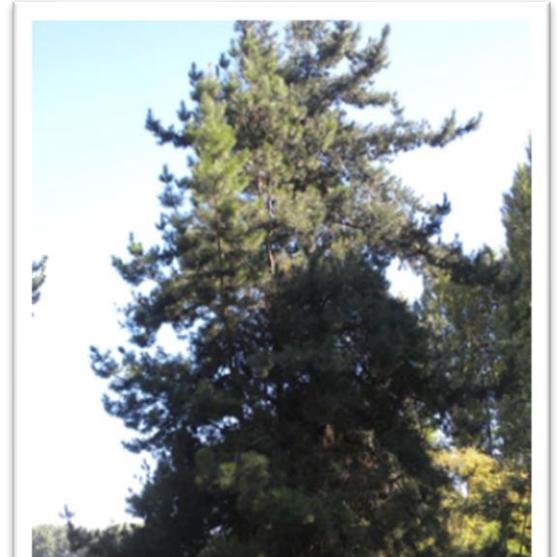


Figura 80: Pino radiata (*Pinus radiata*)

La copa es cónica y oscura; la corteza está formada por placas pequeñas de color gris oscuro. Las hojas se agrupan de 3 en 3; miden 7-15 cm de longitud y son de color verde oscuro. Las piñas, que nacen en grupos de hasta 5 con aspecto de corona, no tienen un pedúnculo apreciable y parecen pegadas a la rama. Las hojas de agujas son de unos 15 cm de longitud agrupadas en tres. Los conos o piñas cuentan con una forma ovoide de 7-14 cm de longitud y están agrupados en parejas o verticilos de 3 a 5, con las escamas externas muy prominentes.

Se desarrolla en casi cualquier suelo, pero prefiere suelos silíceos y profundos. Prefiere climas templados o cálidos, puesto que no soporta inviernos muy fríos, pero soporta hasta temperaturas ocasionales de hasta  $-12^{\circ}\text{C}$ . En cuanto a las precipitaciones el óptimo para la especie es de 800 a 1700 mm anuales, pudiendo tolerar hasta 4 meses de sequía.

#### 4. Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*)

El *Pinus ponderosa* es una especie de coníferas, originaria del oeste de EE. UU. Cuenta con una corteza muy característica, ya que, a diferencia de la mayor parte de las coníferas, tiene una corteza naranja con líneas negras marcando los surcos.

Es un árbol de gran porte, en su área de dispersión natural crece normalmente entre 20 y 40 metros con más de un metro de diámetro, aunque se citan ejemplares de más de 65 metros y 2,5 metros de diámetro. Viven entre 300 y 600 años. Posee una copa de forma piramidal cuando es joven y luego más extendida a medida que pasan los años, aunque dicha extensión será mayor si crece aislado.



Figura 81: Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*)

Es muy utilizado para repoblaciones forestales debido a sus características: Resiste heladas, sequía, e incluso incendios; crece mejor en suelos ligeramente secos y habita en altura entre 1100 y 2000 metros de altitud.

#### 5. Pino pátula (*Pinus patula*)

El pino pátula es una especie arbórea de las Pináceas, originario de México. Presenta un tamaño mediano a grande, que en ejemplares longevos puede alcanzar alturas de hasta 40 m y 120 cm de diámetro. El tronco es recto, cilíndrico en un comienzo y cónico en casi toda su longitud. En árboles jóvenes, inicialmente la corteza es lisa y rojiza, y luego, ésta se torna marrón, áspera y se desprende en escamas.

Crece entre los 1500 y 2700 msnm, no soporta grandes periodos de temperaturas tan bajas como -10 °C, pero puede sobrevivir en climas más fríos por poco tiempo. Es



moderadamente tolerante a la sequía, en este ámbito es superior que *Pinus taeda*. El rango de lluvias óptimo para la especie está comprendido desde los 600 a 2000 mm anuales.

Esta especie está establecida en muchos hábitats y exhibe frecuentemente patrones de variación estrechamente relacionados con variables físicas y ambientales. Se ha introducido con éxito en América del Sur, Sudáfrica, Zimbabwe, Uganda, Kenya, El Congo, Nueva Zelanda, y Australia.

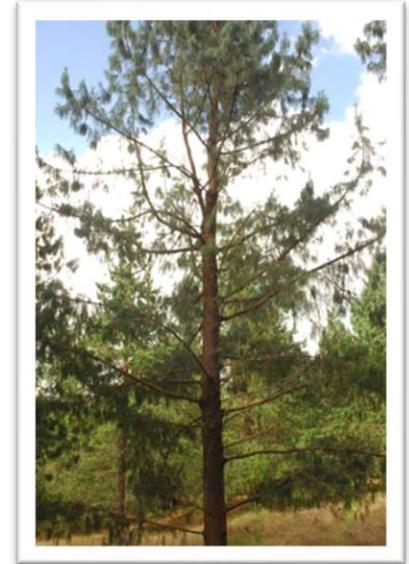


Figura 82: Pino pátula (*Pinus patula*)

#### 6.6.2.2. Listado definitivo de especies a implementar en la repoblación.

De las especies preseleccionadas anteriormente (el molle, el coco, el algarrobo blanco y negro, el tala, el espinillo y el chañar) procedentes a especies autóctonas del área de estudio, se añaden las coníferas, que debido a su mayor velocidad de crecimiento permitirán mejorar las condiciones de establecimiento del primer grupo.

Las especies de pinos que mayor éxito han tenido en plantaciones con fines productivos (para obtener madera) en la Provincia de Córdoba han sido el Pino ellioti y el Pino taeda, y la principal razón es debido a su gran adaptabilidad a las características del clima y del suelo. Es por esto último que estas dos especies de pinos se añadirán al listado de especies para la reforestación, pero además existen registros bibliográficos de que especies como el Pino radiata, Pino ponderosa y Pino pátula también han sido utilizadas exitosamente. Luego de analizar sus hábitats de origen, teniendo en cuentas las características en donde las mismas se suelen desarrollar, se pudo comprobar que estas especies también se adaptarían al área a repoblar en la cuenca de estudio. De esta manera el listado definitivo de especies a utilizar para repoblación forestal es el que se muestra en Tabla 23.

Nº	Nombre	Género y Especie
1	Molle	<i>Lithraea ternifolia</i>
2	Coco	<i>Fagara coco</i>
3	Algarrobo blanco	<i>Prosopis alba</i>
4	Algarrobo negro	<i>Prosopis nigra</i>
6	Tala	<i>Celtis tala</i>
7	Espinillo	<i>Vachellia caven</i>
8	Chañar	<i>Geoffroea decorticans</i>
9	Espinillo	<i>Vachellia caven</i>
10	Chañar	<i>Geoffroea decorticans</i>
11	Garabato	<i>Acacia praecox</i>
12	Pino ellioti	<i>Pinus ellioti</i>
13	Pino taeda	<i>Pinus tadea</i>
14	Pino radiata	<i>Pinus radiata</i>
15	Pino ponderosa	<i>Pinus ponderosa</i>
16	Pino pátula	<i>Pinus patula</i>

Tabla 23: Especies elegidas para la repoblación forestal.

### 6.6.3. PREPARACIÓN DEL TERRENO

La preparación del terreno procura crear las condiciones propicias para el arraigo y el desarrollo de la planta. Las técnicas de preparación del suelo se clasifican en función de la profundidad, superficie, perfil del suelo y forma de ejecución (manual y/o mecanizada). Esta última vendrá condicionada por factores como la topografía, la pedregosidad, defectos del perfil y sociales.

Los objetivos de la preparación del suelo son:

- ✚ Aumentar la capacidad de retención de agua del perfil, a través del aumento de profundidad del mismo.
- ✚ Aumentar la tasa de infiltración de agua en el suelo, disminuyendo la escorrentía y, por ende, la erosión hídrica.
- ✚ Aumentar la profundidad útil del perfil y mejorar las propiedades edáficas físicas,
- ✚ Facilitar la penetración mecánica de las raíces de las plantas introducidas, mejorando transitoriamente la permeabilidad mediante los trabajos, de modo que un sistema radicular más extenso pueda compensar la baja fertilidad o la falta de agua y así aumentar la supervivencia.



- ✚ Minimizar las posibilidades de invasión de matorral (o vegetación no deseada) después de la plantación.
- ✚ Aumentar el drenaje en caso de suelos compactos o hidromórfico<sup>11</sup>.

Con la preparación del terreno en el clima mediterráneo se busca la mayor captación de agua para la plántula. El tamaño del hoyo tiene una gran incidencia en las zonas con sequía transitoria. Una mayor dimensión disminuye las posibilidades de marras y facilita las posibles reposiciones. Las tareas de plantación se comienzan con el hoyado durante el invierno para de esta forma preparar el cuenco que recibirá la planta, ablandando el terreno, aireándolo y facilitando el ingreso del agua de lluvia.

Una de las problemáticas que presenta la cuenca de estudio es la elevada pedregosidad del terreno, lo cual dificulta o impide (en muchos casos) los trabajos de preparación del suelo. Otro problema, son las elevadas pendientes que existen en la parte alta de la cuenca, donde se llevará a cabo la mayor parte de la repoblación.

La elección del método de preparación del terreno está condicionada principalmente por las pendientes, donde cada método tiene un límite:

- ✚ La retroaraña (Figura 83) puede actuar sin problema hasta pendientes del 50%, llegando hasta un 60% dependiendo del tipo de suelo.
- ✚ La miniretroexcavadora (Figura 84) puede actuar hasta pendientes del 30%.
- ✚ La preparación manual puede superar el 60% de pendiente.

---

<sup>11</sup> Suelo formado con estancamiento de agua durante toda o parte de su formación.



*Figura 83: Retroaraña.*



*Figura 84: Miniretroexcavadora.*

Para la elección del método de preparación se han tenido en cuenta diferentes factores:

- ✚ Vegetación existente (plano nº 12, Documento 2, Planos)
- ✚ Pendiente (plano nº 13, Documento 2, Planos)
- ✚ Tipo de suelo (Apartado 3.2. Geomorfología, Geología y Suelos).

#### 6.6.4. MÉTODO DE IMPLANTACIÓN DE LA VEGETACIÓN Y DENSIDAD DE PLANTACIÓN

Los métodos más utilizados para implantación de la vegetación son dos: la siembra, que se basa en la colocación directa sobre el terreno a repoblar semillas de las especies seleccionadas; y la plantación, que consiste en colocar plántulas (cepellón, Figura 86 o a raíz desnuda, Figura 85).



Figura 86: Plántula con cepellón.



Figura 85: Plántula a raíz desnuda.

Escoger plántulas con raíz desnuda favorece el desarrollo natural y equilibrado del sistema radical y aéreo, y es válido, sobre todo, para los viveros de zonas frescas (donde existe un período de parada vegetativa de los árboles) y a poca distancia del territorio a repoblar; además es preferible para especies de crecimiento en sus primeras edades no muy rápido (Marcelli, 1984). Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes: exige importantes superficies y unos requisitos concretos de suelo (Tinus y Owston, 1984), trabajo laborioso y de aplicación de tratamientos (Cousin, 1976) y sobre todo no es aconsejable en las estaciones cálidas y áridas (características del clima mediterráneo), debido a los problemas de deshidratación de la planta, con lo que debe de protegerse contra la sequedad y observar especial cuidado en la manipulación hasta el lugar de la plantación (Cousin, 1976).

Por otro lado, la producción de planta en envase mejora estos aspectos, puesto que aminora la crisis postransplante, ya que el sistema radical inicial se conserva íntegramente y no hay interrupción en la alimentación de la planta (Marien y Drovin, 1978) manteniendo la humedad durante el transporte del vivero al campo (protegiendo a la planta contra el estrés hídrico), además está menos expuesta a los daños mecánicos y permite controlar la micorrización (Marcelli, 1989; Riedacker, 1986). Estudios han demostrado que las plantas en contenedor han mejorado la supervivencia y el crecimiento inicial de muchas plantaciones (Tinus y Owston, 1984). Debido a lo antes mencionado es que se propone la plantación en cepellón para la incorporación de las nuevas plántulas al terreno debido a las ventajas de este método frente la siembra, las cuales son las siguientes:

- ✚ Mayor probabilidad de éxito y resistencia a los riesgos meteorológicos que las plantas recién nacidas de semillas.
- ✚ Ahorro considerable de tiempo equivalente a la edad de las plantas introducidas.
- ✚ Densificación o cobertura de la superficie a repoblar más rápida y regular del terreno.
- ✚ Menor riesgo de enfermedades y plagas en las primeras edades.
- ✚ Plantar permitirte tener mayor control para predecir futuros resultados.
- ✚ Menor coste de los futuros tratamientos.

El marco de plantación utilizado para las repoblaciones será a tresbolillo, en caso de que no pueda realizarse de dicha manera, será aleatorio en función de las características del terreno y de la disponibilidad de espacio para las nuevas plántulas, de esta forma se logrará naturalidad y discontinuidad de la masa arbórea (aspecto muy importante para la prevención de grandes incendios).

La metodología de plantación varía con la pendiente, el tipo de suelo, la especie en cuestión y la accesibilidad. Desde el uso de pico y pala, en las zonas más escarpadas de las sierras (con presencia de piedra fragmentada), hasta la plantación mecanizada, con implementos surcadores tirados por tractor (Figura 88) o mediante hoyadoras (Figura 87).



Figura 87: Hoyadoras para tractor.



Figura 88: Implementos surcadores para tractor

En cuanto a la densidad de plantación, esta variará entre 1.300 y 1.700 plantas/Ha., en función de la vegetación existente y la especie a plantar. La densidad será menor en aquellos lugares en los que ya se ha desarrollado un estrato arbustivo o arbóreo con especies de interés para la conservación; las actuaciones en estas zonas serán de tratamientos selvícolas. En cambio, en zonas sin desarrollo de la vegetación anterior, la densidad será mayor (pero dentro del rango mencionado).

#### 6.6.5. TRABAJOS COMPLEMENTARIOS A LA PLANTACIÓN

##### **Tubos protectores**

Son tubos que se colocan alrededor de la planta diseñados para mejorar el establecimiento inicial de las mismas y su posterior desarrollo, fabricados generalmente en plástico traslúcido (aunque existen de materiales biodegradables)

de altura variable y acompañados de tutor para mejorar su sujeción, especialmente en aquellos de más de 60 cm. de altura, evitando así su caída (ver Figura 90).

Poseen las siguientes ventajas:

- Crean un microclima que favorece el crecimiento gracias al efecto invernadero que se genera dentro de los mismos.
- Protegen a las plántulas de la acción desecante del viento
- Mejora de la visibilidad de las plantas, lo que evita que sean dañadas.
- Suministran protección contra la roedores, ganado o fauna local.
- Protegen de herbicidas.

El microclima que se genera dentro del tubo protector permite aumentar la resistencia de la planta a periodos secos, vientos y fuertes insolaciones directas sobre el tronco y las hojas. Producen un aumento de la temperatura exterior, el cual resulta beneficioso en invierno, pero no tanto en verano, es por ello que deben diseñarse con perforaciones laterales para facilitar la recirculación del aire y regulación de la temperatura interior. En caso de zonas de calor extremo, no son aconsejables este tipo de tubos protectores por lo que sería recomendable el uso de protectores de mallas, que no alteran las condiciones climatológicas de la planta.

Los protectores no deben retirarse hasta que la planta esté suficientemente desarrollada, manteniéndose no más de 2 años. Existen modelos que cuentan con una línea de autoapertura láser con el fin de asegurar la rotura del tubo si el diámetro de la planta supera el diámetro del protector antes de su degradación o de que los mismos sean retirados, a fin de no lastimar a la planta.

### **Uso de hidrogeles:**

Se utilizan para incrementar la retención de agua y nutrientes en suelos. Además, actúan como reservorio de agua con el fin de liberarla según las necesidades de las plantas, lo que permite mejorar el desarrollo vegetal y condiciones de arraigo. El aporte de hidrogel produce un aprovechamiento mayor de las lluvias y ayuda en la reducción de las mareas, debido que hace aumentar la supervivencia. Las dosis de hidrogel



varían entre 5 a 15 gramos por planta y el mismo debe colocarse en contacto con las raíces. En suelos arenosos las dosis deben ser mayores que para otro tipo de suelo.

Poseen las siguientes ventajas:

- Aumenta el contenido de agua disponible y reduce la lixiviación de fertilizantes, debido a su capacidad para absorber nutrientes.
- Mejora la supervivencia en especial en períodos de sequía.
- Ayuda a reducir la compactación del suelo, generando un incremento en la tasa de infiltración del agua.
- Ambientalmente seguro y biodegradable.



Figura 89: Uso de hidrogeles.

### Realización de rebalseta o pequeño alcorque

Se realizará una rebalseta o alcorque para favorecer la recogida de agua procedente de las precipitaciones. De esta manera se aumenta la captación de aguas de lluvia en la zona de la planta, para su posterior infiltración en la zona radicular lo que permite aumentar la humedad del suelo en dicha zona y así la supervivencia de la planta (ver Figura 90).

### **Colocación de castillete:**

Consiste en la colocación de piedras alrededor de la planta con la finalidad de proteger a la misma de las inclemencias climatológicas como viento y radiación excesiva; también sirven para proteger a las plántulas de la fauna y de ser pisadas (ya sea por personas o vehículos). Al igual que la rebalseta sirven para aumentar la humedad en la zona de la radicular (ver Figura 90).



*Figura 90: Ejemplo de una plántula de pino dentro de un tubo protector, con alcorque y castillete de piedras.*

#### **6.6.6. TRABAJOS SILVÍCOLAS SOBRE LA VEGETACIÓN EXISTENTE**

La plantación es propicia realizarla sobre terrenos previamente desmalezados, o habiendo reducido la cobertura vegetal, potencial competidora de las plántulas que se pretenden implantar. En el caso de la zona serrana, lo habitual es encontrarse con lotes pastoreados en forma intensiva, con un bajo volumen de cubierta vegetal, aunque pueden existir superficies en donde sea necesario realizar un cambio de uso de suelo, por lo que en este caso será necesario realizar trabajos silvícolas para la remoción de la vegetación no deseada.

El tratamiento a la vegetación existente se realiza por los siguientes motivos:

- Mejorar el porcentaje de éxito, o dicho de otra manera, minimizar el porcentaje de marras al disminuir la competencia de agua y nutrientes de esta vegetación con la plantada.
- Reducir el riesgo de incendios y su propagación.
- Mejora la accesibilidad, por lo que facilita los trabajos de preparación de suelo y plantación.

Los tratamientos sobre la vegetación existente de especial interés para la conservación consisten en desbroces, raleo, podas, clareos, etc. A continuación, se explicarán los trabajos más importantes:



### **Raleo:**

El raleo consistente en la extracción de los individuos menos valiosos, defectuosos o con problemas sanitarios con la finalidad de conservar en la plantación los ejemplares de mayor valor haciéndoles disponibles mayor proporción de recursos (luz, agua, nutrientes). Los trabajos se realizarán principalmente mediante motosierra.

### **Podas:**

La poda consiste en la supresión de ramas de los árboles en pie, sean muertas o vivas, de forma artificial, para conseguir favorecer el crecimiento del árbol, con el fin de llegar a tener una cubierta arbórea adulta y protectora. La poda de formación es la operación consistente en la eliminación de las ramas de los árboles jóvenes, normalmente las inferiores, con el fin de lograr una copa equilibrada y un desarrollo adecuado del fuste; este tipo de poda suele ser la más utilizada en los primeros años de la repoblación forestal.

Las podas son una eficaz forma de prevención contra incendios, ya que rompen la continuidad entre las ramas de los árboles y el matorral, es decir cortando la continuidad vertical del combustible. Además, facilitan el acceso de los equipos de extinción, así como para realizar los trabajos silvícolas.

Los trabajos se realizarán mediante tijeras manuales de podar o motosierra, y los cortes que se darán serán limpios, no debiéndose producir desgarros que puedan dañar a la planta.

### **Clareo:**

Corta ordenada de pies arbóreos para reducir la densidad de la masa forestal (número de pies por ha) en beneficio de los pies restantes.

El clareo se realiza principalmente mediante motosierra.

### **Desbroce:**

Los desbroces forestales, son tratamientos silvícolas destinados a la eliminación selectiva del matorral (o vegetación que se desea eliminar). Su carácter selectivo

permite dirigirse a un espectro limitado de especies y tamaños, no actuando sobre las especies que se desean conservar.

Tradicionalmente, al desbroce forestal le seguía el procedimiento de quema para la destrucción de los residuos generados. Esta técnica constituye una práctica nada recomendable, puesto que presenta inconvenientes como el vertido de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o el incremento del riesgo de incendios forestales.

El desbroce se puede hacer de forma manual o mecanizado. El desbroce manual se realiza con motodesbrozadoras o sierras de desbrozar. El desbroce mecanizado es el más recomendable, por su mayor rapidez de ejecución, aunque su utilización está supeditado a las condiciones de accesibilidad y topografía del área a intervenir.

Cuando la densidad de la vegetación existente sea muy elevada, se actuará realizando aperturas de calles de 2 metros de anchura, cada 10 metros aproximadamente, mediante desbrozadora de cadenas accionada por tractor (Figura 91). Dichos caminos facilitan los trabajos de acordonado del residuo forestal generado, su recogida y extracción hasta los puntos de procesado.



*Figura 91: Desbrozadora de cadena accionada por tractor.*

### **Control de plagas y enfermedades:**

Otros de los tratamientos silviculturales son el control de plagas y enfermedades, que en función de la especie, ubicación y manejo, puedan manifestarse. Generalmente orientado a un manejo integrado que incluye medidas preventivas, paliativas y de control.

A esto, y aún desde las tareas preparatorias para la plantación, se sostiene en los primeros años, el control de hormigas, mediante cebos tóxicos o la aplicación de



insecticidas en los propios hormigueros; y el control de roedores, mediante el uso de mallas o barreras que protegen los tallos de las plántulas, y también con el empleo de repelentes olfativos. Estas estrategias de control no letal permiten disminuir la pérdida de especies y al mismo tiempo lograr el éxito en la supervivencia de las plántulas.

### **Eliminación de los residuos generados:**

Se realizará el acopio de los restos obtenidos formando pequeños montones o fajas, en zonas accesibles por el tractor, de forma que se faciliten las posteriores operaciones de eliminación de residuos.

También se llevará a cabo la retirada de madera quemada y limpieza de restos de incendios, utilizándose parte de dicha madera, si fuera el caso, para la construcción de fajinas, albarradas o actuaciones necesarias para protección del suelo frente la erosión.

Los residuos de los trabajos de poda y desbroce serán triturados mediante una serie de pasadas con desbrozadora de cadenas accionada por tractor. En aquellas zonas donde no sea posible acceder con el tractor ni su recogida, debido a la pendiente y/o a la accesibilidad, se procesarán los residuos mediante motodesbrozadora con disco triturador.

El objetivo que se busca con la trituración y eliminación es evitar el incremento de materiales combustibles frente a los incendios forestales, impedir la formación de plagas y acelerar la incorporación de la materia vegetal al suelo. La retirada de la madera muerta constituye una actuación de carácter fitosanitaria para la masa forestal. En aquellos sitios donde sea accesible la astilladora, se utilizará para triturar de forma óptima los residuos obtenidos de podas,



*Figura 92: Motodesbrozadora con disco triturador.*



*Figura 93: Astilladora forestal.*

desbroces y clareos. Las astilladoras como se muestran en la Figura 93 tienen la capacidad de triturar troncos de hasta 40 cm de diámetro.

#### 6.6.7. TRATAMIENTOS DE PREVENCIÓN CONTRA INCENDIOS

Se trata de actuaciones que se realizan en la masa forestal para modificar los modelos de combustible existentes y crear discontinuidades (lineales), para reducir el grado de peligro y evitar la libre propagación del fuego tendiente a producir megaincendios forestales.

Debido a que sería muy costoso realizar actuaciones en toda la cubierta forestal, y que supondría una destrucción del hábitat de mucha flora y fauna, e incluso tendría un alto impacto ambiental y paisajístico, este tipo de actuaciones, suele tener un carácter lineal y perimetral.

Existen 3 modelos principales:

##### **Barreras Cortafuegos:**

Se elimina completamente la cubierta vegetal, llegando hasta suelo mineral. Entre un periodo de mantenimiento y otro, puede originarse como mucho una cubierta herbácea o subarbustiva.

Otra alternativa es la utilización de barreras herbáceas, consistentes en una ancha faja cubierta por vegetación menor que representa una muy pequeña proporción de material combustible por unidad de superficie y cuyo objetivo es separar extensiones cubiertas por árboles y arbustos que constituyen densas masas de combustible pesado. Los sistemas de barreras dividen los grandes sectores boscosos en sectores más pequeños, facilitando así la tarea de circunscribir los incendios dentro de límites más estrechos. La cubierta vegetal empleada para las barreras herbáceas está formada, generalmente, por pastos, aunque a veces se dejan también otros tipos de vegetación menor.

La presencia de vegetación en las barreras cortafuego se recomienda por varias razones (Green & Bentley, 1967):

- Una es la conveniencia de evitar el alto coste que significa mantener una ancha faja de terreno totalmente exenta de vegetación.
- En segundo lugar, una cubierta de pastos continua puede prevenir o reducir la invasión del matorral a la barrera.



- En tercer lugar, la cubierta vegetal es necesaria para reducir al mínimo la erosión del suelo.

### Fajas auxiliares:

Fajas a ambos lados de una vía (carretera, senda, etc) o de un curso de agua, en la que se reduce la carga de combustible, total o parcialmente mediante técnicas de desbroce selectivo en franjas de 15 a 20 metros.

### Áreas cortafuegos:

Superficies de anchura variable, bordes irregulares y máxima integración en el paisaje, en las que se reduce la biomasa de manera selectiva para bajar su combustibilidad.

#### 6.6.8. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS BIOLÓGICOS REALIZAR

En el plano nº15 ,Ordenación Hidrológico-Forestal de la cuenca del documento nº2 Planos, se muestran los trabajos biológicos a realizar en la Restauración Hidrológico-Forestal de toda la cuenca alta del río Guanusacate, donde los mismos se clasificarán en Repoblación Forestal, Mantenimiento y Mejora de Arbolado y Mantenimiento y Mejora de Arbustales y Matorrales. Las superficies resultado de la ordenación de la cuenca y que se utilizará para la restauración hidrológico forestal se resumen a continuación:

MEDIDAS A ADOPTAR	Km <sup>2</sup>
Repoblación Forestal	156,5
Mantener y Mejorar Arbolado	113,5
Mantener y Mejorar Arbustales y Matorrales	71,8

Tabla 24: Resultado de la restauración hidrológico-forestal de la cuenca y superficies por medidas a adoptar.

## **Repoblación Forestal:**

La repoblación forestal se realizará en una superficie de 156,5 km<sup>2</sup>, respetando las superficies definidas en el plano n°15. La superficie de la cuenca de estudio se dividió en 3 sectores que presentan similitudes en cuanto al tipo de vegetación y pendientes:

- Cuenca Alta (Altitudes entre los 1200 – 1882 msnm)
- Cuenca Media (Altitudes entre 850 y 1200 msnm)
- Cuenca Baja (Altitudes entre 574 a 850 msnm)

### **Cuenca alta:**

Como podrá observarse en el Plano n° 15, la mayor superficie a reforestar se encuentra en la parte más alta de la cuenca donde se hallan actualmente pastizales deteriorados por los reiterados incendios. En este caso se repoblará en una primera etapa con especies del género *Pinus* (que se adaptan muy bien a las altitudes mencionadas para este sector de la cuenca) definidas en el Apartado 6.6.2. *Definición de especies a implementar* (Pino ellioti (*Pinus ellioti*), el Pino taeda (*Pinus taeda*), el Pino radiata (*Pinus radiata*), el Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) y el Pino pátula (*Pinus patula*), y en una segunda etapa, con aquellas especies autóctonas que están adaptadas a las altitudes mencionadas (coco (Fagara coco), espinillo (*Vachellia caven*), tala (*Celtis tala*) y chañar (*Geoffroea decorticans*)).

La densidad de plantación para la cuenca alta será de 1700 plantas/ha, la más alta del rango especificado en el apartado 6.6.4. debido a que es la superficie con mayor erosión hídrica de la cuenca.

Se deberán llevar a cabo trabajos silvícolas para poder ejecutar la repoblación forestal, consistentes en desbroces mecanizados de los pastizales existentes mediante el uso de desbrozadora de cadenas accionada por tractor en aquellos lugares donde lo permita la topografía y accesibilidad; y un desbroce manual con motodesbrozadoras, en aquellos lugares donde no sea posible llegar con la maquinaria.

En cuanto a la preparación del terreno, se observa que para este sector de la cuenca la pendiente mayoritaria en la zona se encuentra comprendida dentro del rango 0-30 %, por lo que el ahoyado se realizará principalmente con miniretroexcavadora. Sin embargo, existen sectores con pendientes entre 30 - 63% donde el ahoyado será con retroaraña o de forma manual.



### **A- Cuenca media:**

Es de interés repoblar partes de la zona media de la cuenca en donde la agricultura ha avanzado sobre los montes como también en aquellas masas forestales donde la densidad no sea suficiente para proteger el suelo de la erosión. En este sector se utilizarán parte de las especies autóctonas definidas en el Apartado 6.6.2. que mejor se adapten a las altitudes comprendidas entre los 850 y 1200 msnm, dentro de las cuales se encuentran: molle (*Lithraea ternifolia*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), algarrobo negro (*Prosopis nigra*) y garabato (*Acacia praecox*).

La densidad de plantación para este sector de la cuenca variará de 1700 plantas/ha para aquellos sectores donde la agricultura ha avanzado sobre el monte, a valores comprendidos de 800 a 1300 plantas/ha en donde se pretenda uniformizar la densidad hasta formar una masa forestal lo suficientemente densa y capaz de proteger el suelo.

Los trabajos silvícolas en este caso serán de desbroce de pastizales o cultivos si los hubiera, para permitir limpiar el terreno y prepararlo para realizar los hoyos de plantación.

En cuanto a la preparación del terreno, se observa que para este sector de la cuenca la pendiente mayoritaria en la zona se encuentra comprendida dentro del rango 10-30 %, por lo que el ahoyado se realizará principalmente con miniretroexcavadora.

### **B- Cuenca baja:**

Finalmente, en la parte baja de la zona de estudio (574 a 850 msnm) se repoblarán aquellos bosques de ribera que se han sido deforestado completamente debido al avance descontrolado de la agricultura. Las especies a implementar en este sector de la cuenca serán las mismas que para la cuenca media.

La vegetación de ribera cumple un papel fundamental en la cuenca ya que: Ayudan estabilizar las márgenes de los cursos de agua, contribuyen a aumentar la infiltración, disminuir la energía de las crecidas y además regulan la entrada a los cursos de agua de sustancias perjudiciales para los ecosistemas acuáticos (como pesticidas y herbicidas) y también de materia orgánica.

Por las razones antes mencionadas es que se repoblará también con densidades altas de plantación de 1700 plantas/ha. Por otro lado, se realizar desbroces para remover la vegetación existente (en caso de que la hubiera) y así facilitar la preparación del terreno. Esta última, dado a que la pendiente en este sector de la cuenca está comprendida entre 0- 20% se realizará con miniretroexcavadora.

### **Mantenimiento y Mejora de Arbolado**

La superficie destinada a mantenimiento y mejora de arbolado será de 113,5 km<sup>2</sup> respetando los valores obtenidos en la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca. Los trabajos por llevar a cabo en la superficie definida en el plano n°15 son los siguientes:

- Se realizarán raleos en las zonas de mayor densidad para reducir la competencia, extrayendo los individuos menos valiosos, defectuosos o con problemas sanitarios.
- Poda de formación sobre los árboles más jóvenes y con capacidad para prosperar.
- Poda para la eliminación de ramas secas de los árboles en pie para disminuir la carga combustible del bosque.
- Podas de ramas bajas de los árboles para cortar la continuidad vertical del combustible (entre los arbustales/matorrales y árboles) y facilitar el acceso de los equipos de extinción, para facilitar los futuros trabajos silvícolas.

### **Mantenimiento y Mejora de Arbustales y Matorrales:**

La superficie destinada a mantenimiento y mejora de Arbustales y Matorrales será de 71,8 km<sup>2</sup> respetando los valores obtenidos en la ordenación hidrológico-forestal de la cuenca. Los trabajos por llevar a cabo en la superficie definida en el plano n°15 son los siguientes:

- Poda para la eliminación de ramas secas con el fin de disminuir la carga combustible.
- Se eliminarán aquellos ejemplares con problemas sanitarios o de menor densidad para disminuir la competencia y favorecer el crecimiento de las especies en mejor estado.



### **Fajas auxiliares:**

- Se realizarán fajas auxiliares (definidas en el Apartado 6.6.7. Tratamientos de prevención contra incendios), consistentes en desbroce selectivo en franjas de 15 m a ambos lados de los cursos de agua y caminos indicados en el plano nº15, del documento 2. Planos, con la finalidad de crear discontinuidades (lineales) en la masa forestal y de esta manera, reducir el grado de peligro y evitar la libre propagación del fuego.

## 6.7. HIDROTECNIAS DE RESTAURACIÓN

Las hidrotecnias de corrección de cauces, como su nombre lo indica, consisten en intervenir en los mismos para estabilizarlos y así evitar problemas severos de erosión. Dentro de la restauración hidrológico-forestal una de las técnicas más utilizadas son las obras transversales. Estas se emplean para controlar el fenómeno torrencial en los cauces de cuencas que presentan crecidas fuertes y violentas, también para regular caudales sólidos incorporados a la corriente en forma de suspensiones (materiales más finos) o acarreos (materiales más gruesos provenientes principalmente de márgenes y lecho de los cauces).

Estas obras transversales, al reducir el paso de caudales sólidos, disminuyen la pendiente longitudinal, estabilizan las laderas, reducen la erosión hídrica y, por ende, controlan el fenómeno torrencial. Además, forman un punto fijo en el lecho del cauce, que regula y disminuye el descenso progresivo del mismo.

Los depósitos que se producen en estas obras van constituyendo un aterramiento que hace subir la cota del lecho hasta alcanzar la pendiente de compensación (pendiente de equilibrio entre la tensión tractiva del agua y la tensión límite de arrastre de los materiales, Figura 94), que será menor a la del cauce en el estado previo a las obras. Esta elevación del lecho permite estabilizar y aumentar la sección del cauce, acrecentar la superficie de escurrimiento y el radio hidráulico (lo que hace descender la velocidad de la corriente y en consecuencia la erosión). Debido a esto se consigue

un terraplén de equilibrio que estabiliza las márgenes y disminuye en gran medida los aportes laterales de sólidos al cauce.

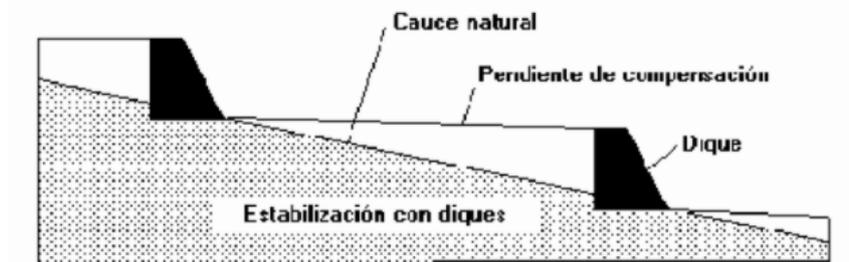


Figura 94: Corrección de torrente mediante diques y albardas. Fuente:

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo\\_fig4\\_268401785](https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785)

#### 6.7.1. ESTADO LEGAL

Las hidrotecnias se ubican dentro del Dominio Público Hidráulico. En el libro IV, el código civil regula sobre cursos de agua y aguas lacustres. En cuanto a los cursos de agua, se dispone que la autoridad de aplicación (Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba) procederá a determinar la línea de ribera de los cursos naturales conforme al sistema establecido por el art. 2577 del Código Civil, para la definición del dominio público (Novak, 2014).

El libro VI del Código Civil trata sobre las obras hidráulicas y en su Art. 206 denomina obra hidráulica a toda construcción, excavación o plantación que implique alterar las condiciones naturales de la superficie, subsuelo, flujo o estado natural de las aguas y tenga por objeto la captación, derivación, alumbramiento, conservación, descontaminación o utilización del agua o defensa contra sus efectos nocivos.

#### 6.7.2. TIPOS DE HIDROTECNIAS DE CORRECCIÓN DE CAUCES

##### A- Diques

Los diques son obras transversales, cuya altura es igual o inferior a 15 m. Si estas obras transversales tienen una altura igual o menor a los 3 m se las denomina albardas.



Los diques se pueden clasificar según la función específica para los que se diseñan, en:

- Diques de consolidación: tienen principal finalidad evitar la erosión en cauces y laderas afectadas por inestabilidad. Este propósito se logra mediante la cuña de aterramiento que se forma sobre el nivel del fondo del cauce y que reduce la pendiente longitudinal del mismo. Se los ubica inmediatamente aguas abajo de los taludes o márgenes a estabilizar, o se disponen escalonadamente a lo largo de aquellos tramos del cauce que más acusadamente presentan fenómenos de erosión lineal.

- Diques de retenida: diseñados para contener la mayor cantidad posible de materiales sólidos o líquidos. Se los sitúa aguas arriba de la zona en que se producen los daños por acarreo o caudales líquidos, aprovechando la existencia de cerradas (valles estrechos) y de ensanchamientos que definan importantes volúmenes de embalse. En el caso de retención de materiales sólidos, los de retención total suelen colocarse como cierre de garganta de torrentes. En cuanto a los diques de retención de caudales líquidos, destacan los de recarga de acuíferos, cuya función es la de embalsar agua, de tal forma que esta pueda infiltrarse y pasar a aumentar el volumen del material del acuífero subyacente.

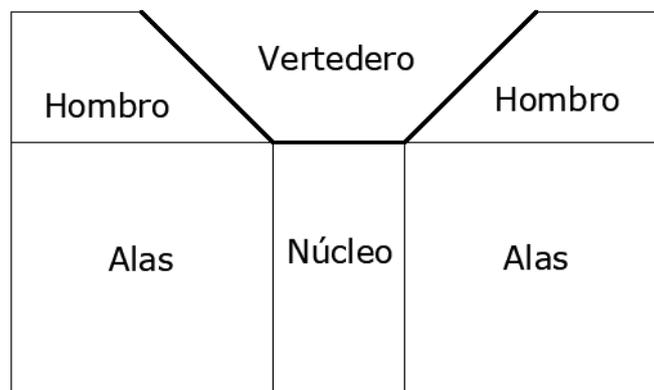
- Diques de laminación: son los que menos incidencia tienen en la lucha contra la desertificación, ya que su función principal es la de disminuir y desfasar en el tiempo la punta de los caudales líquidos de avenida, mediante el embalse temporal del caudal de avenida. Se sitúan en ensanchamientos del cauce que permitan elevados volúmenes de embalse.

Los materiales empleados en el diseño de diques y albarradas pueden ser muy diversos y van de los materiales más tradicionales como el hormigón (en masa, ciclópeo o armado), la mampostería (en seco, hidráulica o gavionada), los materiales sueltos (tierra, tierra armada o escollera) o de restos vegetales, hasta otros más modernos a base de enrejados metálicos, elementos prefabricados o traviesas de ferrocarril. Se puede destacar como novedoso el empleo en zonas afectas por incendios forestales de diques diseñados a base de piedras y biomasa residual que

combinan las técnicas de fajinado con las de mampostería en seco (Tecnolog et al., 2008), las cuales se explicarán más adelante en este apartado.

A excepción de los diques de laminación y de retención de caudales líquidos, que están diseñados para que no se aterren, los diques de retención de materiales sólidos y de consolidación presentan dos etapas básicas en su funcionamiento:

1. Colmatación: donde el empuje hidrostático del agua con sedimentos actúa sobre el paramento aguas arriba del dique.
2. Aterramiento: donde el empuje hidrostático actúa únicamente sobre los hombros del dique, estando sometido el resto de la obra al empuje de tierras (ver Figura 95).



*Figura 95: Componentes de un dique tipo. Fuente: Elaboración propia.*

## **B- Albarradas:**

Como se mencionó anteriormente, las albarradas, son obras transversales de pequeña altura ( $h \leq 3$  m), generalmente de mampostería en seco o gavionada, que se suelen utilizar, en gran número y definidas por secciones tipo, para la corrección de cabeceras de barrancos. En las zonas de fenómenos erosivos avanzados, se utilizarán para estabilizar las cárcavas junto con otras acciones biológicas o para disminuir la pendiente longitudinal del cauce, creando escalones. El cálculo de la estabilidad de estas obras es más sencillo que el de los diques y se les suele dotar en coronación, a modo de vertedero, de una pequeña curvatura que permita centrar mejor las aguas.

Los objetivos que se buscan con las albarradas son:

- Disminuir la velocidad de circulación del agua de escorrentía, evitando o disminuyendo la erosión del cauce y laderas.
- Actuar como barrera para el material arrastrado, disminuyendo los caudales sólidos hacia aguas abajo de la obra y estabilizando laderas y cauce hacia aguas arriba, formando paulatinamente terrazas (a medida que los sedimentos se van acumulando hacia aguas arriba de la obra hasta lograr la pendiente de compensación).
- Laminar los caudales líquidos de avenidas, desfasando el pico máximo en el hidrograma y aminorando su poder erosivo.

En la ubicación definitiva de la albarrada se buscará el sitio que mejor favorezca la retención de sedimentos, localizado en el punto en que la pendiente del lecho sea menor (Figura 96) (IICA, 2012).

Las albarradas se deberán diseñar para un Tiempo de retorno (TR) igual a 25 años y verificarán para eventos torrenciales severos de TR=100 años. Ampliar mucho más estos tiempos encarecerían demasiado las obras y por otro lado, la probabilidad de excedencia sería más baja por lo que no se sería justificable o recomendable.

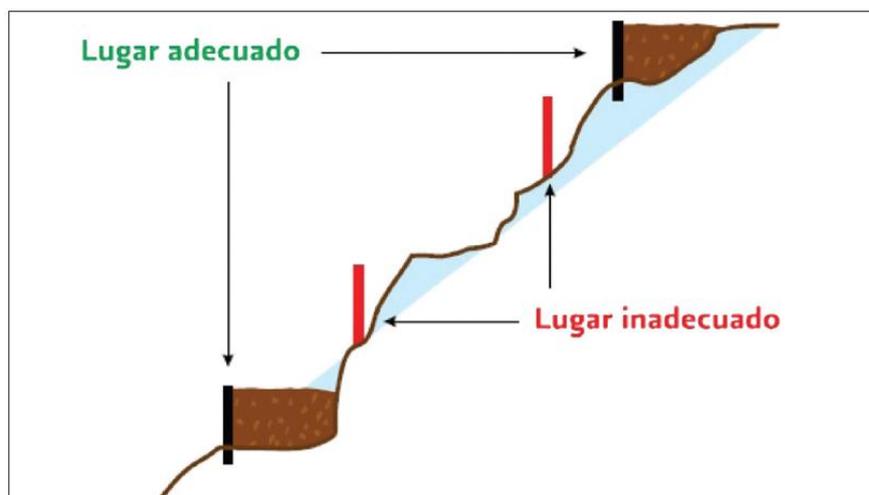


Figura 96: Localización de albarrada más eficiente según pendiente longitudinal de curso de agua o cárcava. Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012.

Una buena práctica constructiva es ejecutar una cama de rocas inmediatamente aguas debajo de la barrera con el fin de amortiguar la caída del agua y así evitar la socavación puntual al pie de la albarrada; lo idea es realizar esta protección con colchonetas de rocas (similares a los gaviones, pero con una mayor superficie sobre el terreno y de menor espesor).

### **C- Fajinas:**

Otro tipo de obra para el control de la erosión hídrica son las fajinas, estructuras realizadas en ladera, construidas siguiendo curvas de nivel, diseñadas para disminuir la longitud efectiva de la pendiente con los objetivos de:

- Frenar el paso del agua disipando su energía cinética, y reduciendo con ello su velocidad a un nivel no erosivo.
- Actuar sobre el origen de las cárcavas, evitando su crecimiento.
- Proteger caminos frente arrastres de ladera.
- Favorecer acumulación de materiales, creando un microclima favorable para la colonización y desarrollo de la vegetación.

En cuanto a los materiales para su ejecución, lo óptimo sería utilizar los troncos y ramas quemados o parcialmente quemados remanes de un incendio con la finalidad de aprovechar dicho material y disminuir costes de obra. En caso de no disponer de este material, se pueden ejecutar las fajinas con fustes de madera provenientes de maderera, o utilizar otros materiales como hormigón o gaviones.

Para su ejecución se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- La altura óptima de la fajina es aproximadamente 25 cm. (Figura 98).
- La longitud de cada fajina dependerá de la topografía no superando valores de 15 m, puesto que se complica la alineación con la curva de nivel (Figura 98).
- La distancia media de separación entre fajinas será de 10 m, aumentando si la línea de máxima pendiente del terreno disminuye y viceversa (Figura 98).
- Las interrupciones de fajinas en diferente cota se realizarán a tresbolillo para salvar la posible erosión de esas separaciones (Figura 98).



Figura 97: Fajinas. Criterios constructivos ( $D$ =diámetro;  $L$ =longitud;  $H$ = Altura). Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012.



Figura 98: Fajinas. Criterios constructivos. Fuente: Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012.

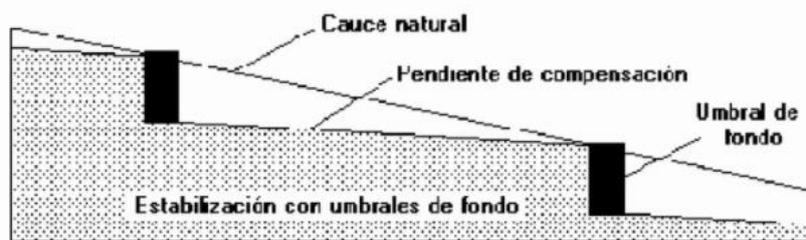
- Se localizarán con carácter general en laderas con una pendiente mayor a 20 % pero menor a 60% (por cuestiones de seguridad de los trabajadores).
- No se ejecutarán en superficies rocosas o pedregosas con una cobertura de suelos mayor del 60%, ya que la baja erosión del suelo, en estos casos, no precisa la construcción de fajinas.
- Tanto para las albarradas como para las fajinas se aconseja progresar utilizando el “criterio de cuenca”, ejecutando el trabajo en la ladera desde arriba

hacia abajo. De este modo es más fácil identificar el flujo del agua ladera abajo y con ello determinar mejor la localización de las fajinas. Además, de esta forma se atiende a la mayor seguridad de los operarios.

- La densidad de fajinas recomendada es de 500 metros lineales por hectárea (Navarro, T., 2015).

#### **D- Umbrales de fondo:**

Otras obras transversales de menor efectividad que los diques son los umbrales de fondo como los observados en la Figura 99. Se trata de pequeñas estructuras generalmente de hormigón, las cuales se entierran en el cauce y pretenden evitar (o disminuir) la erosión del lecho. Por tanto, se logra una pendiente de compensación que reduce el aporte de materiales provenientes del lecho y laderas a la corriente. Esta protección es limitada en el espacio con lo que se recomienda colocar un sistema de ellas para que la protección sea más completa (Tecnolog et al., 2008).



*Figura 99: Corrección de cauce mediante umbrales de fondo. Fuente:*

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo\\_fig4\\_268401785](https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Correccion-de-torrentes-socavantes-diques-y-umbrales-de-fondo_fig4_268401785)

#### **6.7.3. OTROS TIPOS DE HIDROTÉCNIAS**

Las cuencas de Sierras Chicas presentan una superficie de captación relativamente pequeña y tienen limitada capacidad de retención e infiltración lo que ocasiona, de manera cíclica, una baja disponibilidad de agua y en periodos lluviosos, desbordes e inundaciones. En los últimos años, se han producido incendios devastadores de pastizales y bosque serrano, sequías prolongadas e inundaciones catastróficas (como las sucedidas en el mes de febrero de 2015 y 2016). Se trata de un territorio complejo y cambiante, que vincula espacios rurales, urbanos y rururbanos (Figura 100) (Chiavassa et al., 2017).



Los problemas ambientales de la región se ven agravados por una serie de problemáticas que afectan la natural recarga de las cuencas, como son los recurrentes incendios, la creciente ocupación de espacios con urbanizaciones de distintos niveles (planes de vivienda, loteos abiertos, barrios cerrados, complejos turísticos), la deforestación y las explotaciones dedicadas a actividades extractivas. Estos factores, al limitar la capacidad de almacenamiento del agua y su liberación gradual, introducen cambios que implican la aceleración en el escurrimiento de las aguas superficiales de origen pluvial y producen la alternancia de periodos con escasez de agua y otros con exceso (Chiavassa et al., 2017).

Íntimamente relacionado con la ubicación y disposición del agua, el crecimiento poblacional de la Vertiente Oriental de las Sierras Chicas ha sido el proceso social que más ha generado el desmonte y la impermeabilización del suelo. Décadas de cuencas incendiadas y desmontadas para el avance minero y urbanístico, modificaron el paisaje serrano natural y contribuyeron a la baja disponibilidad de agua en el suelo y en las tomas de captación de las localidades que se abastecen y abastecían del agua del subsuelo y arroyos serranos (Chiavassa et al., 2017).

En busca de una solución complementaria a las biotécnicas e hidrotecnias de corrección de cauces, se proponen medidas para aumentar la infiltración y retención de escorrentía consistentes en:

- ✚ Recarga artificial de acuíferos.
- ✚ Prácticas de conservación de suelo y agua.

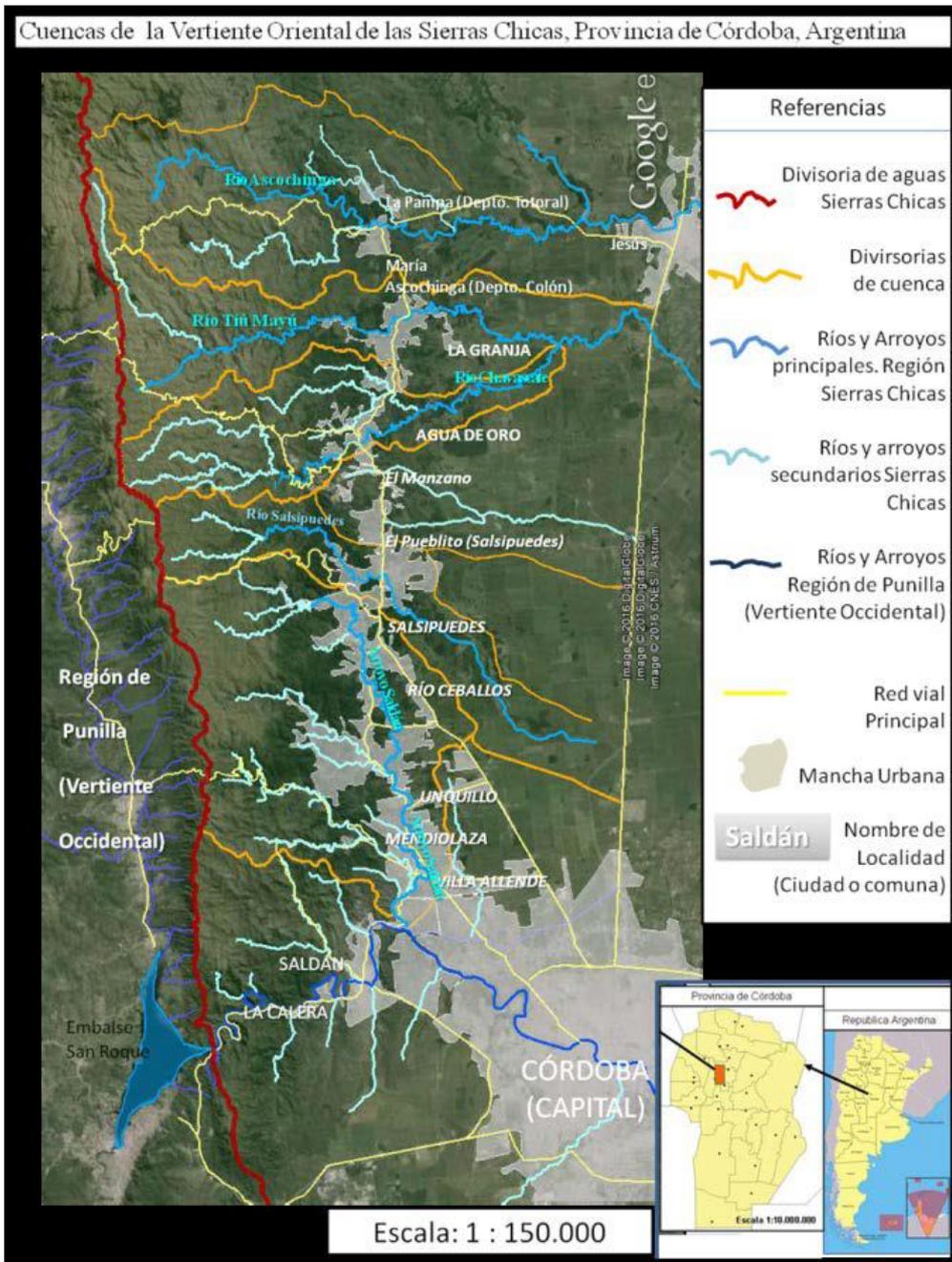


Figura 100: Cuencas de la Vertiente Oriental de las Sierras Chicas. Provincia de Córdoba, Argentina. Fuente: (Chiavassa et al., 2017).

### 6.7.3.1. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Con la finalidad de mitigar este problema de baja disponibilidad de agua en el suelo y muy baja o nula infiltración, que conlleva a una grave alteración en el ciclo hidrológico, se plantea como solución la utilización de recargas artificiales de acuíferos.



Se designa como recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad (IGME, 2011).

Los objetivos de la recarga artificial son diversos, pero dentro de los principales se tienen los siguientes:

- Almacenar escorrentías no reguladas.
- Aumento y optimización del volumen de los recursos hídricos.
- Reducir o eliminar el descenso del nivel de agua producida por bombeos.
- Prevención o corrección del deterioro de la calidad del agua en el acuífero.
- Aprovechamiento del acuífero como red de distribución y como medio depurador debido a la filtración natural que tiene el suelo.
- Compensar las pérdidas de la recarga natural que producen distintas actividades, como por ejemplo: desvíos de agua, obras de toma, encauzamiento, etc.
- Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta o coordinada.

Es importante tener en cuenta que, dado el carácter discontinuo frecuentemente asociado a la escorrentía constitutiva del agua potencialmente recargable, es imprescindible, en numerosas ocasiones, un tratamiento previo a la recarga a nivel diario (dado a las variables características físicas, químicas y biológicas). Por esta razón, es conveniente tener en la entrada de las instalaciones de recarga (IGME, 2011):

- Dispositivos de pretratamiento que permitan realizar actuaciones sobre todas aquellas sustancias no deseables que se desean eliminar o disminuir su concentración.
- Dispositivos de vigilancia y control que permitan rechazar o impedir la entrada a la instalación de recarga del agua que no puede ser tratada

con un cierto grado de garantía o que no cumpla unos determinados estándares de calidad. El contenido de sólidos en suspensión (SS) es un constituyente del agua de recarga sobre el que se debe efectuar un especial seguimiento, ya que este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la posible colmatación que pueden experimentar las instalaciones de infiltración.

También es necesario indicar que no toda la aportación excedentaria de una cuenca es susceptible de aprovechamiento mediante la técnica de recarga artificial de acuíferos, ya que su distribución espacial y temporal no es uniforme, presentando puntas de caudal que obligan a sobredimensionar el tamaño de las instalaciones, con el consiguiente incremento del coste económico, para una utilización reducida y complicada de los dispositivos de infiltración que, incluso, en el caso de una gran avenida, podría conllevar a la destrucción de las instalaciones (IGME, 2011).

#### **Acuífero receptor:**

La recarga artificial se puede practicar, en principio, en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua. Ahora bien, no todos los acuíferos son adecuados para realizar una recarga artificial. La efectividad de la misma está estrechamente ligada a las características hidrogeológicas, hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor, así como al régimen de explotación al que se encuentra sometido.

Normalmente la recarga artificial se practica en acuíferos libres con el nivel freático a profundidad intermedia o próxima a la superficie, bien en materiales granulares como depósitos aluviales o areniscas, bien en materiales consolidados como calizas y dolomías fracturadas y/o karstificadas. No obstante, también se pueden efectuar en acuíferos confinados, o localizados a mayor profundidad, o en materiales granulares relativamente cementados, o en consolidados con ligera fisuración. En estos casos, los caudales de ingreso son menores, presentándose, además, en general, mayores problemas de colmatación (IGME, 2011).

#### **MÉTODOS DE RECARGA EN SUPERFICIE**

Consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Se emplean fundamentalmente en acuíferos libres, que no presentan niveles



de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie del terreno, lo que permite la llegada del agua al acuífero.

## MÉTODOS DE RECARGA EN PROFUNDIDAD

Consisten en la introducción de agua en el acuífero, generalmente mediante pozos, sondeos, etc. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables.

### 6.7.3.2. PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO

De acuerdo con los criterios de ordenación de cuenca desarrollados en el apartado 5.3. se creó el plano nº15 el cuál define las distintas acciones o medidas a tomar para la ordenación de la cuenca. Como puede observarse en dicho plano existe una superficie ubicada en la parte baja del área de estudio en donde se proponen desarrollar trabajos de conservación de suelo, para poder disminuir las pérdidas elevadas de suelo existentes actualmente (plano nº10) y, por otro lado, retener la mayor cantidad de agua en el suelo (sin que la misma escurra en su totalidad hacia aguas abajo).

Estas obras pueden ser de diferente tipo, pero dentro de las que se consideran aplicables a la cuenca de estudio se mencionan a continuación:

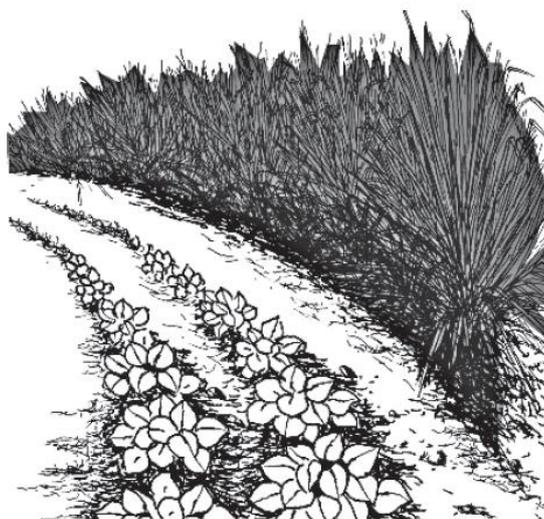
- 1- Establecimiento de barreras vivas.
- 2- Acequias o zanjas a nivel para captar agua.
- 3- Acequias o zanjas a desnivel para drenar el exceso de agua de lluvia.
- 4- Barreras muertas de rocas para controlar la erosión.

Es importante antes de iniciar cualquiera de estas técnicas el trazado de curvas a nivel en las laderas de cultivo en donde se realizar las obras. Estas son líneas que tienen la misma altura en cualquier punto y es fundamental materializarlas para el replanteo de los trabajos, ya que permiten que el agua se detenga y se distribuya a lo largo de la línea de igual nivel, facilitando la infiltración en capas inferiores del suelo y favoreciendo al cultivo con mayor humedad.

Para ejecutar y ubicar estas líneas en el terreno se pueden utilizar distintos tipos de equipos topográficos como estación total o GPS diferencial.

### **1- Establecimiento de barreras vivas.**

Las barreras vivas son hileras de plantas sembradas a poca distancia, en curvas de nivel, con el objetivo de conservar el suelo y protegerlo de la erosión. Se pueden utilizar para su ejecución pastizales o matorrales xerófilos de densidad media a alta para garantizar el efecto filtro que se pretende conseguir para retener los sedimentos acarreados por la escorrentía (Figura 101). Para optimizar este efecto se pueden colocar rastrojos o material de poda al lado superior de la barrera (IICA, 2012).



*Figura 101: Ejemplo de barrera viva para la conservación de suelo. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central*

La distancia entre barreras vivas depende de la pendiente y del tipo de suelo (ver Tabla 25) y se combinan bien con otras técnicas como las acequias.

Estas obras permiten reducir la velocidad del agua de escorrentía porque divide la ladera en pendientes más cortas y además reducen la velocidad del viento protegiendo a los cultivos de interés (IICA, 2012).

El buen manejo de la barrera viva da como resultado la formación paulatina de terrazas, sin necesidad de utilizar maquinaria para movimiento de suelo.



Obras de conservación de suelo	Pendiente		
	Suave menor a 15%	Moderada 15 - 30 %	Fuerte 30 - 50%
Barreras vivas	15 -30 m	10 - 15m	4 - 10 m
Barreras muertas	10 - 20 m	6 - 10 m	4 - 6 m
Acequias	10 - 20 m	8 - 10 m	6 - 8 m

*Tabla 25: Distancia entre obras de conservación de suelo según el porcentaje de la pendiente. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central.*

Por otro lado, es importante realizar podas periódicas de la barrera viva para que no ocupe espacio del cultivo. Se recomienda realizar al menos dos podas al año, aunque dependerá del tipo de especie utilizada como barrera viva.

## 2- Acequias o zanjas a nivel para captar agua

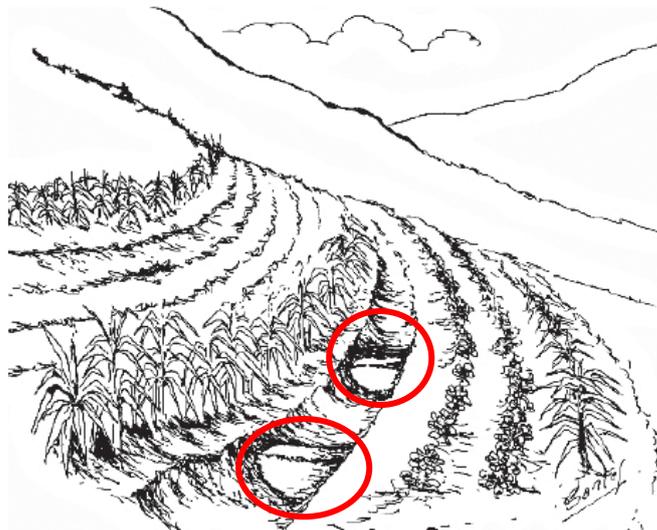
Son canales que se construyen a nivel, en dirección transversal a la pendiente, para retener, conservar y ayudar a infiltrar el agua de lluvia que cae sobre las laderas. Cada zanja requiere la colocación de barreras vivas o muertas en el borde superior de su estructura, para que el agua de escorrentía, el suelo erosionado y otros sedimentos arrastrados por la lluvia no la obstruyan. Cuando sea necesario, al final de cada acequia se pueden abrir pozos para infiltración de los excedentes de agua (IICA, 2012).

Al igual que en las barreras vivas la distancia entre acequias depende del porcentaje de pendiente en la parcela (Tabla 25). Las acequias se recomiendan especialmente para zonas de clima árido o semi árido, ya que en zonas húmedas existe el riesgo de acumulación excesiva de agua y sobresaturación del suelo.

En suelos arcillosos de baja infiltración se deben hacer acequias profundas para evitar que el agua se rebalse y se deben combinan con barreras vivas para estabilizar los taludes; esto último también se aconseja para suelos arenosos.

La construcción de acequias es difícil y costosa en suelos pedregosos. Una solución a dicho inconveniente es construir pequeños terraplenes de rocas en el borde superior

de la zanja (barreras muertas) para reducir la entrada de sedimentos. Por otro lado, se recomienda construir tabiques de tres a seis metros de distancia, para mantener una distribución proporcional del agua en la parcela (véase Figura 102).



*Figura 102: Ejecución de tabiques en acequias para optimizar la distribución de agua en la parcela. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central.*

Como se mencionó anteriormente, las acequias tienen la función de retener el agua que pasa por las barreras vivas y permiten que se infiltre lentamente en el suelo. No se construyen para controlar la erosión del suelo provocada por escorrentía, ya que dicha función la realiza la barrera viva, que se siembra en la parte superior de la acequia. El agua que se retiene en la acequia se infiltra en la parcela y ofrece humedad al cultivo (IICA, 2012).

### **3- Acequias o zanjas a desnivel para drenar el exceso de agua de lluvia**

Son zanjas o canales contruidos con un desnivel del 1% (aunque puede ser menor) en dirección transversal a la pendiente, para captar el agua de escorrentía y drenar el exceso fuera del área de cultivo sin provocar erosión o cárcavas. Estas zanjas se complementan con desagües en los márgenes de las parcelas para conducir los excedentes y evacuarlos de manera regulada hacia aguas abajo para no afectar al cultivo.



Estas obras se recomiendan para zonas con precipitaciones de media a alta intensidad y para suelos con baja capacidad de infiltración. En la parte superior de las acequias se recomienda sembrar barreras vivas para retener los sedimentos que arrastra la escorrentía, con la finalidad de aumentar la vida útil de estas obras. La distancia entre acequias depende del grado de pendiente en la parcela como en las demás obras mencionadas (véase Tabla 25).

Al igual que en las zanjas a nivel, la construcción de acequias es difícil y de coste elevado en el caso de suelos pedregosos. Es por ello, que se recomienda hacer terraplenes de rocas o mejor aún con barreras vivas en el borde superior de la zanja para reducir la entrada de sedimentos y aumentar la vida útil de la obra.

La primera finalidad de la acequia a desnivel es distribuir el agua en la parcela y drenar el exceso que pudiera afectar al cultivo, en segundo lugar, contribuyen a la conservación del suelo cuando se combinan con barreras vivas o muertas, dando como resultado luego de pocos años, terrazas de suelo estable.

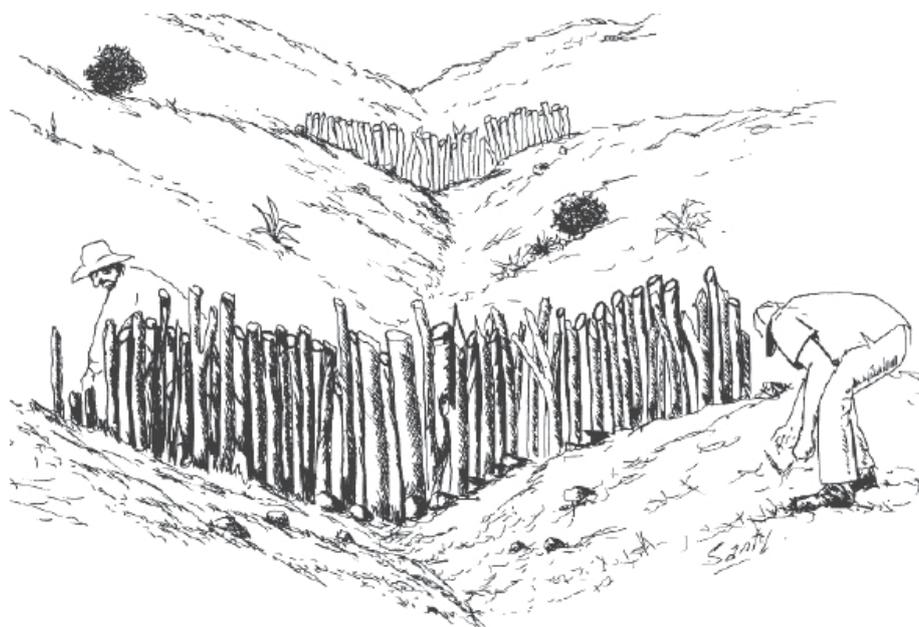
#### **4- Barreras muertas de rocas**

Se trata de muros relativamente bajos, que se construyen con las mismas rocas que se encuentran en la parcela, disponiéndolas según las curvas de nivel, para evitar o minimizar problemas de erosión en los suelos de ladera. Las mismas se combinan muy bien con barreras vivas posicionadas en el borde superior de estas estructuras; cuando van acompañadas de las mismas mejoran la infiltración de agua y la fertilidad del suelo (IICA, 2012).

Tienen la función de reducir la velocidad de la escorrentía e captar el suelo que se transporta con la escorrentía (sólidos suspendidos) en las partes superiores de la cuenca. En pocos años, las barreras muertas contribuyen a la formación de terrazas en la medida que se va reteniendo el suelo; este tiempo en establecerse la terraza dependerá del grado de erosión hídrica presente en la cuenca.

Con estas obras es posible tener un control en el desarrollo de cárcavas, mejorar la retención de sedimentos e infiltración del agua en el suelo y, por tanto, aumentar la humedad y el rendimiento en los cultivos.

En caso de no disponer de rocas en el suelo, se puede obtener un resultado similar ejecutando estas barreras con postes hincados en el terreno como se muestran en la Figura 103.



*Figura 103: Barreras de postes para la retención de sedimentos y acarreos. Fuente: Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central.*

Cuando la vida útil de la barrera se agota, es decir, cuando el suelo se acumula hasta la altura de la barrera muerta; si el problema de erosión persiste será necesario aumentar su altura colocando más rocas (aumentando el nivel de la barrera). De esta manera, la ladera se transforma paulatinamente en un terreno con pendientes más atenuadas debido a las terrazas que se van materializando.

Es una excelente obra para el control de la erosión, pero si las curvas de nivel en donde se posicionan las barreras están desniveladas aumentan las probabilidades de que se formen orificios o espacios vacíos en donde se desencadene un proceso erosivo que pueda comprometer la vida útil de la obra. Es por ello, que los trabajos de mantenimiento son fundamentales para que las estructuras puedan funcionar correctamente (IICA, 2012).



#### 6.7.4. HIDROTECNIAS PROPUESTAS

De las hidrotecnias de restauración mencionadas y desarrolladas dentro del apartado 6.7. Hidrotecnias de Restauración a continuación se indicarán cuáles serán las que se proponer realizar en este trabajo fin de máster:

##### **A- Albarradas:**

Se plantea realizar un mayor número de pequeños diques, como son las albarradas, en lugar de uno o dos diques de grandes dimensiones, por las razones que se indican a continuación:

- Al construirlas con rocas del lugar, las albarradas quedaran integradas con el medio, por lo que el efecto paisajístico será menor si se lo compara con un dique de hormigón armado de gran envergadura.
- Además, el uso de rocas del sitio (que son abundantes en la parte alta de la cuenca) traerá aparejado la reducción del coste global de la obra, no solo por el ahorro en material sino también debido a la disminución de las necesidades de transporte (que la mayoría de las veces es más alta que el coste del material).
- Las superficies de inundación serán menores, esto se traduce en menores riesgos de inundación a infraestructuras o espacios de interés.
- Al tratarse de un mayor número de estructuras, es posible establecer un cronograma de ejecución por fases empezando por aquellas donde la erosión hídrica sea mayor y luego continuar por el resto; de esta manera se necesitará una menor inversión inicial para comenzar más rápidamente la ejecución de las obras.

Para el emplazamiento de las albarradas se definieron sectores en donde se sugirieron posibles ubicaciones (véase plano nº 18, Documento 2. Planos), para lo cual se tuvo en cuenta el área de mayor erosión hídrica de la cuenca, obtenida en los planos 7, 8, 10 y 11 del documento 2. Planos, donde la misma se concentra en la zona alta de la cuenca (por encima de los 1000 msnm).

Se proponen realizar albarradas con las especificaciones técnicas que se detallan a continuación:

- Las mismas serán de gaviones (reellenas de piedras, en la medida de lo posible que sean del lugar) y revestidas con mortero para una mayor protección del tejido de acero.
- Se diseñarán para un Tiempo de retorno (TR) igual a 25 años y verificarán para eventos torrenciales severos de TR=100 años.
- Se colocará en coronación, a modo de vertedero, de una pequeña curvatura que permita centrar mejor las aguas en el cauce.
- Además, se colocará una superficie de colchonetas o área cubierta con rocas fijadas al lecho, inmediatamente aguas abajo de la albarrada a fin de amortiguar la caída del agua y evitar socavaciones que puedan comprometer la estabilidad de la estructura.
- La cantidad de albarradas, sus dimensiones y ubicaciones precisas serán definidas en un proyecto específico y de detalle.

#### **B- Recarga artificial de acuíferos:**

Por otro lado, se propone realizar recargas artificiales en el acuífero por las razones que se detallan a continuación:

- Se podrán infiltrar los excesos hídricos de escorrentías no reguladas, disminuyendo el riesgo de avenidas violentas que pudieran producir cuantiosas pérdidas económicas y humanas.
- El agua infiltrada recargará los acuíferos y esto producirá un aumento de la humedad en el suelo que estará disponible para un mayor crecimiento de la vegetación (que tendrá la función de controlar la erosión) y además se podrá aprovechar este recurso en la parte baja de la cuenca para distintas actividades como consumo humano, riego, etc.

Se plantean métodos de recarga a profundidad mediante técnicas de infiltración con pozos o inyecciones con bombas y realizando un pretratamiento para eliminar no solo los sólidos suspendidos (que limitan la vida útil de la obra) sino también para sustancias no deseadas que pudieran afectar la calidad de las masas de agua subterráneas. De acuerdo con lo mencionado en el apartado 3.2. Geomorfología, Geología y Suelos, los suelos presentes en la zona de intervención son poco profundos y de permeabilidad baja y es por ello que, no se plantean técnicas de infiltración de superficie como zanjas o camas de infiltración. Por otro lado, se aclara



que la definición y diseño de las instalaciones de recarga y pretratamiento de agua a inyectar en el acuífero no serán contemplados en este trabajo fin de máster, ya que requerirá un proyecto aparte y específico de ingeniería.

### **C- Obras de conservación de suelo:**

Se proponen ejecutar técnicas de conservación de suelo en la cuenca baja, en una superficie de 78,8 Km<sup>2</sup> (véase plano nº 15, Documento 2. Planos) de acuerdo con el apartado 6.7.3.2. consistentes en:

- 1- Establecimiento de barreras vivas.
- 2- Acequias o zanjas a nivel para captar agua.
- 3- Acequias o zanjas a desnivel para drenar el exceso de agua de lluvia.
- 4- Barreras muertas de rocas para controlar la erosión

Con estas obras o prácticas, debido a la acumulación progresiva de sedimentos en pocos años se formarán terrazas; estas al lograr una pendiente menor a la del terreno (pendiente de compensación) posibilitarán el aumento de la infiltración, lo que se traduce en una mayor cantidad de humedad en el suelo y por consiguiente un mayor desarrollo de los cultivos. Al mismo tiempo, esta cubierta de vegetación protegerá al suelo de la erosión hídrica.

Todas estas acciones se traducirán en un menor acarreo de sedimentos hacia aguas abajo que no solo disminuirá la severidad de las crecidas, sino también reducirá los requerimientos en mantenimiento de las redes de drenaje que colapsan año tras año por la acumulación excesiva de sedimentos.

Se proponen realizar una combinación de barreras vivas o muertas y acequias a nivel (sin pendiente) para toda la superficie a intervenir con prácticas de conservación de suelo, con las especificaciones técnicas que se detallan a continuación:

- En caso de encontrar excesiva pedregosidad en la parcela, que dificulte la excavación de la acequia, se utilizarán barreras compuestas de rocas del lugar (barreras muertas, descritas en el Apartado 6.7.3.2. ).

- Las barreras vivas o muertas se ubicarán aguas arriba de la acequia con la finalidad retener el sedimento, evitando que entre dentro de la acequia, y así aumentar la vida útil de la obra.
- Para el replanteo de las acequias se utilizará estación total o GPS diferencial a fin de asegurar de que estén situadas en una misma curva de nivel (es decir, sobre líneas de igual pendiente).
- Dado a que en esta superficie la pendiente está comprendida entre un 10 y 20 %, la separación entre una barrera y otra deberá ser de 10 m (de acuerdo con la Tabla 25)
- Para la ejecución de las acequias se utilizará un tractor dotado de un elemento surcador.

#### **D- Fajinas:**

Se ejecutarán fajinas en aquellas laderas en donde la erosión hídrica es elevada (de acuerdo al plano nº10, del documento 2.Planos) y pueden existir problemas como formación de cárcavas próximas a caminos o poblados (ver plano nº18, del documento 2.Planos), en donde las hidrotecnias antes mencionadas (albarradas y obras de conservación del suelo) pueden no ser suficientes. Se procurará en la medida de lo posible utilizar troncos resultantes de trabajos silvícolas o fustes y ramas de árboles remanes de incendios forestales. Las especificaciones técnicas para la ejecución de fajinas son las que se detallan a continuación:

- La altura óptima de la fajina es aproximadamente 25 cm. (Figura 98).
- La longitud de cada fajina dependerá de la topografía no superando valores de 15 m (Figura 98).
- La distancia media de separación entre fajinas será de 10 m, aumentando si la línea de máxima pendiente del terreno disminuye y viceversa (Figura 98).
- Las interrupciones de fajinas en diferente cota se realizarán a tresbolillo (Figura 98).
- Se localizarán con carácter general en laderas con una pendiente mayor a 20 % pero menor a 60%.
- No se ejecutarán en superficies rocosas o pedregosas con una cobertura de suelos mayor del 60%.
- Se ejecutarán en la ladera desde arriba hacia abajo.



- La densidad de fajinas recomendada es de 500 metros lineales por hectárea

## 7. CONCLUSIONES

- Se propone una repoblación forestal en una superficie de 156,5 km<sup>2</sup> con especies autóctonas y de pinos, con el propósito de controlar las grandes pérdidas de suelo de la cabecera de la cuenca.
- Se ejecutarán trabajos de silvicultura consistentes en mantenimiento y mejora de arbolado en una superficie de 113,5 km<sup>2</sup> y de mantenimiento y mejora de arbustales y matorrales en un área de 71,8 km<sup>2</sup>, con el fin de disminuir la carga combustible y aumentar la protección del suelo.
- Se efectuarán fajas auxiliares a ambos lados de determinados caminos y cursos de agua, con la finalidad de crear discontinuidades (lineales) en la masa forestal y de esta manera, reducir el grado de peligro y evitar la libre propagación del fuego.
- Se proponen ejecutar albarradas en la zona alta de la cuenca con la finalidad de controlar la erosión hídrica de los cursos de agua y laderas; y al mismo tiempo regular caudales líquidos y sólidos.
- Se plantean realizar recargas artificiales en el acuífero para disminuir el exceso de escurrimiento, aumentar la infiltración, y por ende, la disponibilidad del recurso hídrico en toda la cuenca.
- Se proponen realizar obras de conservación de suelo, consistentes en una combinación de barreras vivas o muertas con acequias a nivel, con la intención de conservar el suelo y aumentar su humedad.
- Se ejecutarán fajinas en aquellas laderas en donde se quiera salvaguardar una población o infraestructura de importancia o existan problemas de erosión hídrica severos.
- Es fundamental para poder apreciar cambios considerables y revertir el elevado deterioro que posee la cuenca de estudio, realizar una planificación y ordenamiento de acciones, mediante un proyecto, para toda la cuenca, ya que acciones aisladas y sin coordinación, en donde no se involucren a todos los agentes, no tendrán el impacto suficiente para restaurar la cuenca

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Argañaraz, J. (2016). Dinámica espacial del fuego en las Sierras de Córdoba. *Tesis Doctoral*, 217. <https://www.researchgate.net/publication/301635295>
- Barbeito, G. O., Dasso, G. C., Ambrosino, G. S., Rico, I. A., Rydzewski, B. A. L., Capone, G. M. E., Mortarino, G. N., Lanfranco, G. M., Moya, B. D., Cruz, I. M. P., Tomasini, I. A. S., Catalini, I. C., Rico, I. A., & Barbeito, G. O. (2017). *ESTUDIO GEO-HIDROLÓGICO DEL RÍO GUANUSACATE EN SU PASO POR EL ÁREA URBANA DE JESÚS MARÍA*.
- Cabrera, A., & Matteoda, E. (2014). *Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba*.
- Capitanelli, Argüello, G. L., Dohrmann, R., & Mansilla, L. (2012). Loess of Córdoba (Argentine) central plain, present state of knowledge and new results of research. In *Argentina: Environmental, Geographical and Cultural Issues*.
- Catalini, G., Carlos M. García, Gabriel Caamaño Nelli, B. B. (2011). *Estudios actuales sobre precipitación máxima probable en la provincia de Córdoba*.
- Catalini, C., Rico, A., & Barbeito, O. (2017). *ESTUDIO GEO-HIDROLÓGICO DEL RÍO GUANUSACATE EN SU PASO POR EL ÁREA URBANA DE JESÚS MARÍA - PRIMER INFORME DE AVANCE*.
- Chiavassa, S., Ensabella, B., & Deón, J. U. (2017). Territorialidades en conflicto y acciones colectivas: las luchas por el agua en Sierras Chicas, provincia de Córdoba, Argentina. *Agua y Territorio*, 10, 43. <https://doi.org/10.17561/at.10.3608>
- De La Casa, A. C., & Ravelo, A. C. (2003). Assessing temperature and humidity conditions for dairy cattle in Córdoba, Argentina. *International Journal of Biometeorology*, 48(1). <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0179-x>
- Enrique Gallardo, & Franz, S. (2005). *IUFRO World Series Volume 16 La Contribución del Derecho Forestal - Ambiental al Desarrollo Sustentable en América Latina IUFRO World Series Vol. 16 al Desarrollo Sustentable en América Latina: Vol. L*.
- Farina, A., & Fuller, S. (2017). An Introduction to Landscape Ecology (Theories and Applications) Landscape Patterns and Soundscape Processes. *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*.
- Ferrara, C., Cecchini, M., Salvati, L., & Zambon, I. (2019). Sustainable development



and policies against desertification. In *Land Degradation: The Main Challenge*.

Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*.

Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, L., Pizarro, M., & Rigo, P. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. In *INTA-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.  
[https://inta.gov.ar/sites/default/files/libro\\_erosion\\_hidrica\\_rep\\_argentina.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf)

Gavier-pizarro, G. I., & Período, E. N. E. L. (2004). *Deforestación de las Sierras Chicas de Córdoba (Argentina) en el período 1970- 1997. December 2015*.

Giorgis, M., Cingolani, A., & Cabido, M. (2013). M. A. Giorgis. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 48, 493–513.

Green, L., & Bentley, R. (1967). *Barreras Cortafuego Herbáceas Para El Control De Los Incendios Forestales*. 10(2), 1–5.

Hoyos, L. E., Cingolani, A. M., Zak, M. R., Vaieretti, M. V., Gorla, D. E., & Cabido, M. R. (2013). Deforestation and precipitation patterns in the arid Chaco forests of central Argentina. *Applied Vegetation Science*, 16(2).  
<https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2012.01218.x>

Hoyos, Laura E, Gavier-Pizarro, G. I., Kuemmerle, T., Bucher, E. H., Volker, •, Radeloff, C., & Tecco, P. A. (2010). *Invasion of glossy privet (Ligustrum lucidum) and native forest loss in the Sierras Chicas of Córdoba, Argentina*.  
<https://doi.org/10.1007/s10530-010-9720-0>

Hudson, N. W. (1992). *Soil and Water Conservation (Second Edition)*. By F. R. Troeh, J. A. Hobbs and R. L. Donahue. Hemel Hempstead, Herts, UK: Prentice Hall, (1991), pp. 530, £55.65, ISBN 13-832324-X. *Experimental Agriculture*, 28(1).  
<https://doi.org/10.1017/s0014479700023188>

IGME, I. G. y M. de E. (2011). *Recarga artificial de acuíferos*.

- IICA. (2012). Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central. *Proyecto de Red de Innovación Agrícola*, 1–20. <http://repiica.iica.int/docs/b3470e/b3470e.pdf>
- Klinger, R. C. (2020). Fire Regimes. In *Encyclopedia of Biological Invasions*. <https://doi.org/10.1525/9780520948433-057>
- LEY 10115 -CREACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE POLICÍA AMBIENTAL. (2012). *LEY 10115 - CREACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE POLICÍA AMBIENTAL*. 53(9), 1689–1699.
- Mainardi, V. (2013). Regiones Fitogeográficas de Argentina y de Tucumán. *Guía Didáctica de Asignatura Ecología General- UNT*.
- Manzano García, J., & Martínez, G. (2017). Percepción de la Fauna Silvestre en Áreas Protegidas de la Provincia de Córdoba, Argentina: Un Enfoque Etnozoológico. *Etnobiología*, 15(1).
- Mariana Pagot, C. G. y M. Z. (2017). *REGISTRO HISTÓRICO DE CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO JESÚS MARÍA PROVOCANDO EL COLAPSO DEL SISTEMA DE ACCESO DE UN PUENTE*. 16(1), 86–102.
- Navarro, T., G.-S. E. . (2015). Manual para la realización de albarradas y fajinas para el control de la erosión en zonas forestales afectadas por el incendio de Hellín (Albacete) de 2012. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 102(41), 89–102. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i41.17380>
- Novak, A. R. S. (2014). “ *El Código de aguas de la provincia de Córdoba y normas complementarias .*” 57–82.
- Platt, R. V. (2012). Mapping Settlements in the Wildland-Urban Interface: A Decision Tree Approach. *Professional Geographer*, 64(2). <https://doi.org/10.1080/00330124.2011.601191>
- R. Repetto, Kio, P. R. O. (1988). R. Repetto 1988. The forest for the trees? Government Policies and the Misuse of Forest Resources. World Resources Institute, Washington,. *Journal of Tropical Ecology*, 6(2). <https://doi.org/10.1017/s0266467400004247>
- Takiya, D. M. (2000). Efeito De Borda Sobre a Riqueza De Aves Insetívoras E



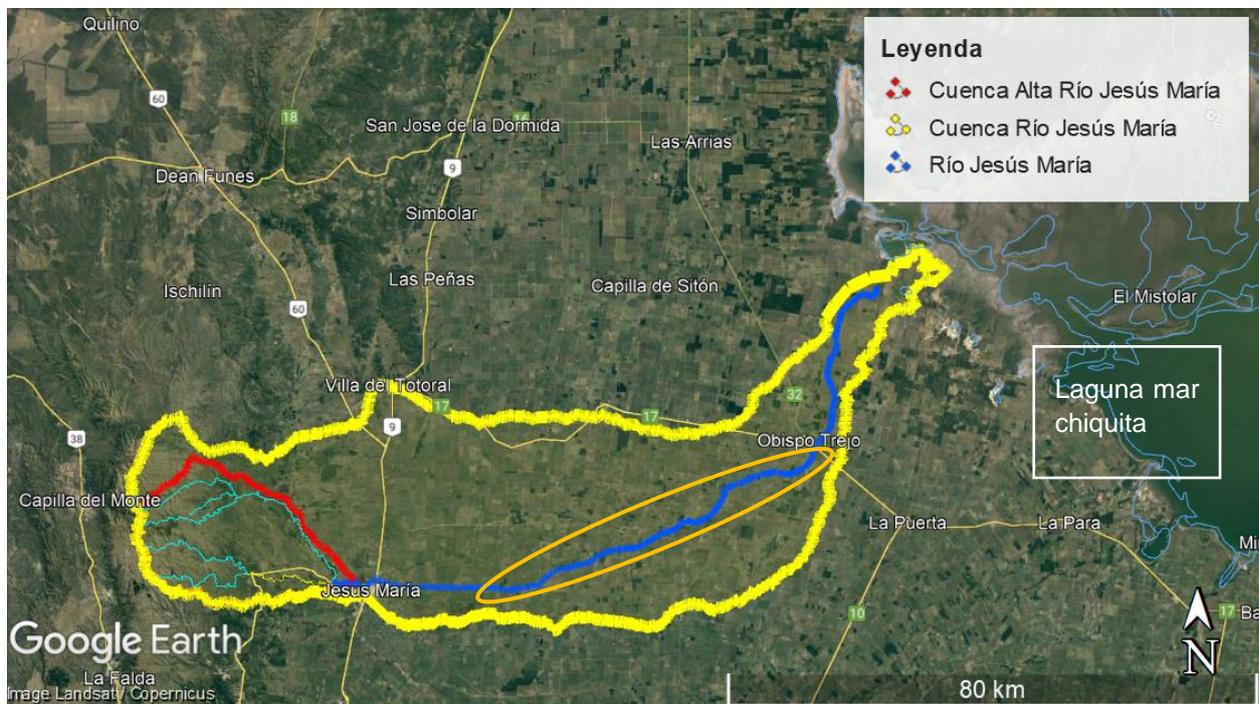
Abundância De Artrópodes : Existe Alguma Relação? *Ecologia Da Floresta Amazônica – Relatório de Curso de Campo, 1501(Km 41).*

Tecnolog, I. D. E., Disponibles, A. S., Espa, E. N., La, P., Contra, L., & Desertificaci, L. A. (2008). *Ficha de la tecnología.* 1–5.

Zhu, Z., Key, C., Ohlen, D., & Benson, N. (2006). Evaluate Sensitivities of Burn-Severity Mapping Algorithms for Different Ecosystems and Fire Histories in the United States. *Final Report to the Joint Fire Science Program, Project JFSP 01-1-4-12.*

## ANEXO 1.- ESTADO DE LA CUENCA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Jesús María o río Guanusacate ubicada al norte de la Provincia de Córdoba tiene problemas severos de erosión hídrica. Dicha cuenca tiene el mismo nombre que la ciudad de Jesús María la cual es atravesada por dicho río en sentido Oeste-Este y termina desembocando en la laguna Mar Chiquita (Figura 1). La confluencia de las aguas de los Ríos Ascochinga y Santa Catalina (principales ríos de la cuenca alta, donde se centra el estudio) da origen al Río Guanusacate.



*Figura 1: Cuenca Río Jesús María. En color naranja se indica la zona con problemas recurrentes de desbordes del río.*

Los severos problemas de erosión hídrica afectan a la cuenca de forma integral, pero lo hace de distintas maneras según el lugar a que se haga referencia; en la cuenca alta debido principalmente a las altas pendientes y escasa vegetación se producen las mayores pérdidas de suelo, mientras que en la parte media y baja debido a una disminución en el perfil topográfico se producen procesos de sedimentación del material arrastrado. En la cuenca alta los problemas están relacionados a avenidas violentas que destruyen todo a su paso, las cuales desplazan grandes cantidades de

sedimentos hacia aguas abajo; mientras que en la cuenca media y baja los problemas son debido a inundaciones de superficies agrícolas producidas por obstrucciones de las redes de drenaje y ascenso del lecho del río por encima del nivel natural del terreno que producen los sedimentos al depositarse (Figura 4, Figura 5 y Figura 6).

Si se traza un perfil longitudinal sobre el río Guanusacate vinculado a su afluente, el Río Ascochinga (ver Figura 2), podremos observar cómo desciende la pendiente, de valores superiores a 24% (en la cuenca alta) a valores próximos a 0% (en la cuenca baja). Esto permite comprender de una mejor manera como la topografía condiciona en gran medida el comportamiento hidrológico de la cuenca y la importancia que tiene la vegetación en la cuenca alta para contener el suelo y que no se produzcan los fenómenos de erosión hídrica y posterior obstrucción de los cursos de agua debido a la cantidad excesiva de sólidos suspendidos (SS) que son arrastrados por el río. Esta elevada concentración de SS se puede evidenciar fácilmente en la coloración que posee el agua en especial en la cuenca media del curso de agua de referencia (ver Figura 3).

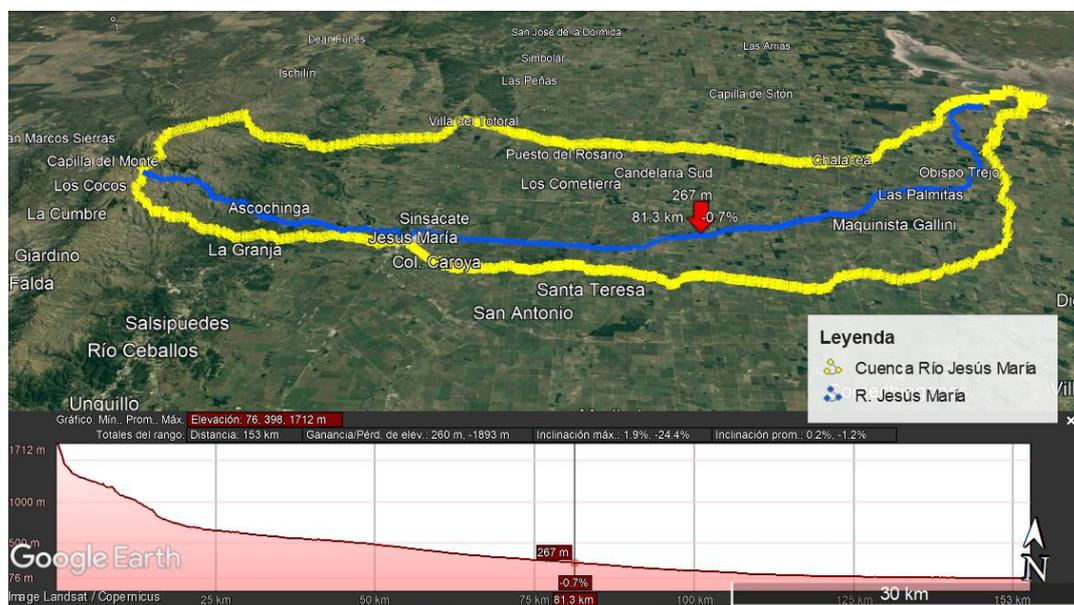


Figura 2: Perfil longitudinal del río Guanusacate junto con el río Ascochinga.

En Figura 7 y Figura 8 se observa como los sedimentos arrastrados desde la parte alta de la cuenca obstruye a uno de los principales puentes de la zona indicada en



Figura 1; se trata del puente Cacho Caro el cuál debió reemplazarse por parte de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba en el año 2019 debido a que el mismo se obstruía constantemente y provocaba el desvío del río, inundando a la localidad de Maquinista Gallini (ubicada a 10 km aguas abajo del puente).



*Figura 3: Coloración típica del agua del Río Jesús María en su cuenca baja que demuestra la gran cantidad de sedimentos que el mismo transporta.*



*Figura 4: Desborde del río Guanusacate tomadas desde un dron el día 13/06/19.*



*Figura 5: Desborde del río Guanusacate tomadas desde un dron el día 13/06/19.*



*Figura 6: Desborde del río Guanusacate tomadas desde un dron el día 13/06/19.*



*Figura 7: Obstrucción de puente-vado Cacho Caro, ubicado en el centro de la zona de color naranja de la Figura 1.*



*Figura 8: Obstrucción de puente-vado Cacho Caro, ubicado en el centro de la zona de color naranja de la Figura 1.*



En Figura 9 y Figura 10 se pueden observar los trabajos constantes de mantenimiento que se deben realizar para desobstruir los cursos de aguas de sedimentos y reforzar los terraplenes de contención en ambas márgenes; estas tareas se llevan a cabo con la finalidad de evitar desbordes que pudieran afectar a localidades cercanas al río como también a regiones agrícolas y ganaderas.



*Figura 9: Trabajos de refuerzo de terraplenes de contención sobre el río Jesús María.*



*Figura 10: Trabajos de mantenimiento sobre río Jesús María.*



En Figura 11 se observa uno de los muchos trabajos de emergencia que debió realizar la Secretaría de Recursos Hídricos para evitar un desborde del río Jesús María.



*Figura 11: Trabajo de emergencia para obstruir el desborde del río Jesús María dentro del tramo señalado en Figura 1.*