

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTOBAL DE HUAMANGA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“Estimación de la Erosión Hídrica y el Manejo de Aguas en  
la Cuenca de Yucaes -Huamanga - Ayacucho - 2017”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERA AGRÍCOLA**

**PRESENTADO POR:  
Violeta Saccatoma Cacyamarca**

**Ayacucho – Perú**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

Tesis

**Estimación de la Erosión Hídrica y el Manejo de Aguas en la Cuenca  
de Yucaes - Huamanga - Ayacucho - 2017**

Expedido : 21 de marzo del 2018

Sustentado : 03 de abril del 2018

Calificación : Muy buena

Jurados :

.....  
**Ing. Juan Charapaqui Anccasi**  
**Presidente**

.....  
**Ing. Efraín Chuchón Prado**

.....  
**Ing. Eduardo Pacori Quispe**

.....  
**Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe**  
**Asesor**

A Dios Todopoderoso por darme la vida y enseñarme las bondades de su creación, de bendecir mí camino, así como darme la sabiduría, la salud y la esperanza.

A mis padres Germán y Beatriz, quienes me dieron la vida y me enseñaron con ejemplo, dedicación y mucho esfuerzo a ser una persona de bien para el desarrollo de la sociedad.

A mis queridos hermanos: Shéryda y Ronald por su comprensión.

A mis catedráticos(as), quienes me brindaron e inculcaron su conocimiento con paciencia, durante mi formación profesional.

A mi catedrático, Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe por dirigir, guiar y asesorar el trabajo de investigación.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento se dirige a mi Dios, quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, el que en todo momento está conmigo ayudándome y guiando el destino de mi vida.

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, alma mater de mi formación profesional, a la facultad de Ciencias Agrarias y Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por haberme brindado la oportunidad de acogerme en el seno del saber y donde tuve el gran honor de formarme como un Profesional.

A mis padres por apoyarme, brindarme su cariño y motivarme siempre a luchar por nuestros ideales, orientándome siempre a vivir plenamente y bajo el calor de los principios y valores humanos.

A mis catedráticos, quienes supieron transmitirme sus sabias enseñanzas e hicieron un aporte invaluable en mi formación académica contribuyendo paso a paso en aras de una buena formación profesional.

Mi agradecimiento al Dr. Antonio Jerí Chavez, Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, por haberme facilitado este ámbito para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A los miembros del Jurado del presente trabajo de investigación por el interés, motivación, apoyo y sus valorables sugerencias a la versión original, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento de la tesis.

A mi catedrático, Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe por su paciencia, asesoramiento, generosidad, consejos, amistad, calidad humana y experiencia profesional demostrada en cada momento, han sido un gran apoyo durante todo el tiempo dedicado a la realización del trabajo de investigación, la cual sin su ayuda y orientación no se habría culminado, ni logrado el nivel de calidad y compromiso que requería el presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                       | <b>Pág.</b> |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Carátula .....                                                        | i           |
| Hoja de sustentación .....                                            | ii          |
| Dedicatoria .....                                                     | iii         |
| Agradecimientos .....                                                 | iv          |
| Índice general .....                                                  | v           |
| Índice de tablas .....                                                | viii        |
| Índice de figuras .....                                               | ix          |
| Índice de cuadros .....                                               | x           |
| Índice de gráficos .....                                              | x           |
| Índice de anexos .....                                                | xi          |
| Índice de siglas y acrónimos .....                                    | xii         |
| Resumen .....                                                         | xiv         |
| Introducción .....                                                    | 1           |
| Descripción del problema .....                                        | 2           |
| Justificación del proyecto .....                                      | 2           |
| Objetivos .....                                                       | 3           |
| Objetivo general .....                                                | 3           |
| Objetivos específicos .....                                           | 3           |
| <br><b>CAPITULO I</b>                                                 |             |
| <b>MARCO TEÓRICO .....</b>                                            | <b>4</b>    |
| 1.1 Antecedentes .....                                                | 4           |
| 1.2 Estudio hidrológico en cuencas .....                              | 6           |
| 1.2.1 Cuenca hidrográfica .....                                       | 6           |
| 1.2.1.1 Conceptos generales .....                                     | 6           |
| 1.2.1.2 Características fisiográficas .....                           | 6           |
| 1.2.1.2.1 Tiempo de concentración (Tc) .....                          | 9           |
| 1.2.2 Escorrentía o escurrimiento superficial .....                   | 9           |
| 1.2.2.1 Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia ..... | 11          |
| 1.2.2.2 Periodo de retorno .....                                      | 12          |
| 1.2.2.3 Riesgo .....                                                  | 13          |
| 1.2.2.4 Caudales .....                                                | 13          |
| 1.2.2.4.1 El método Racional Modificado .....                         | 14          |
| 1.2.2.4.2 Método de Mac Math .....                                    | 15          |
| 1.2.2.4.3 Método de Iszkowski .....                                   | 16          |
| 1.2.2.5 Determinación de la escorrentía directa de una tormenta ..... | 17          |
| 1.3 Erosión hídrica .....                                             | 20          |
| 1.3.1 El suelo. Textura .....                                         | 20          |
| 1.3.1.1 Importancia de la granulometría .....                         | 20          |
| 1.3.2 Erosión del suelo .....                                         | 21          |
| 1.3.2.1 Tipos de erosión .....                                        | 23          |
| 1.3.3 Degradación del suelo .....                                     | 26          |
| 1.3.3.1 Factores que intervienen en la erosión hídrica .....          | 26          |

|             |                                                                       |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.3.2     | Factores que causan degradación de suelo inducida por el hombre ..... | 28 |
| 1.3.3.3     | Procesos de degradación del suelo .....                               | 28 |
| 1.3.3.4     | Tasa de recuperación del suelo, T.R.S .....                           | 29 |
| 1.3.3.5     | Consecuencia de la degradación del suelo .....                        | 29 |
| 1.3.3.6     | Daños que causa la erosión hídrica .....                              | 30 |
| 1.3.3.7     | Formas de medición de la la erosión hídrica .....                     | 31 |
| 1.3.4       | La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) .....                | 32 |
| 1.3.4.1     | Pérdida Anual de suelo "A" y aporte de sedimento "AS" .....           | 34 |
| 1.3.4.2     | Estimación del factor R .....                                         | 35 |
| 1.3.4.2.1   | Clasificación de rangos típicos de R anual .....                      | 36 |
| 1.3.4.3     | Estimación del factor K .....                                         | 36 |
| 1.3.4.3.1   | Clasificación FAO/UNESCO .....                                        | 41 |
| 1.3.4.3.1.1 | Región litosólica .....                                               | 41 |
| 1.3.4.3.1.2 | Vitric andosol .....                                                  | 42 |
| 1.3.4.4     | Estimación del factor LS (topográfico) .....                          | 42 |
| 1.3.4.4.1   | Estimación de la pendiente (S) .....                                  | 43 |
| 1.3.4.4.2   | Longitud de la pendiente .....                                        | 43 |
| 1.3.4.5     | Estimación del factor, C .....                                        | 44 |
| 1.3.4.6     | Estimación del factor, P .....                                        | 45 |
| 1.3.4.6.1   | Estimación de la erosión hídrica potencial .....                      | 46 |
| 1.3.4.6.1.1 | Clasificación de la erosión hídrica potencial .....                   | 46 |
| 1.3.4.6.2   | Estimación de la erosión hídrica actual .....                         | 47 |
| 1.3.4.6.2.1 | Clasificación de la erosión actual .....                              | 47 |
| 1.4         | Sedimentos .....                                                      | 48 |
| 1.4.1       | Transporte de sedimentos por corrientes .....                         | 48 |
| 1.4.1.1     | Producción de sedimentos o aporte de sedimentos, AS .....             | 49 |
| 1.4.1.1.1   | Estimación de aporte de sedimentos .....                              | 50 |
| 1.4.1.1.2   | Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente .....          | 52 |
| 1.5         | Prácticas mecánicas de conservación del suelo .....                   | 54 |
| 1.5.1       | Manejo de laderas .....                                               | 54 |
| 1.5.1.1     | Obras de protección .....                                             | 54 |
| 1.5.1.1.1   | Sistema de andenería .....                                            | 55 |
| 1.5.1.1.2   | Diseño de un muro de contención tipo pirca .....                      | 69 |
| 1.5.1.1.3   | Canales de desviación .....                                           | 72 |
| 1.5.1.1.4   | Zanjas de infiltración .....                                          | 77 |
| 1.5.1.1.5   | Diques para el control de cárcavas .....                              | 82 |
| 1.5.1.1.6   | Sistema de forestación y reforestación .....                          | 89 |
| 1.5.2       | Plan de control de la erosión .....                                   | 89 |
| 1.5.3       | Vulnerabilidad .....                                                  | 90 |
| 1.6         | Herramientas disponibles para el análisis .....                       | 90 |
| 1.6.1       | El papel de los SIG y teledetección en los estudios de erosión ....   | 90 |
| 1.6.1.1     | Modelos de caja blanca disponibles .....                              | 91 |
| 1.7         | Definición de términos .....                                          | 94 |

## CAPÍTULO II

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>METODOLOGÍA</b>                                              | 102 |
| 2.1 Ubicación del proyecto                                      | 102 |
| 2.2 Materiales y Equipos                                        | 105 |
| 2.2.1 Materiales de escritorio                                  | 105 |
| 2.2.2 Equipos y herramientas                                    | 105 |
| 2.3 Enfoque metodológico                                        | 105 |
| 2.3.1 Problemas específicos                                     | 105 |
| 2.3.2 Investigación aplicada                                    | 105 |
| 2.3.3 Método                                                    | 106 |
| 2.3.2.1 Nivel de investigación                                  | 106 |
| 2.3.2.2 Diseño de investigación                                 | 106 |
| 2.3.2.3 Población y muestra                                     | 106 |
| 2.3.2.3.1 Nivel de confiabilidad. Formula de Kuder y Richardson | 107 |
| 2.4 Procedimiento                                               | 109 |

## CAPÍTULO III

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>RESULTADOS</b>                                                                                                   | 111 |
| 3.1 Determinación de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos                                     | 111 |
| 3.1.1 Parámetros agrológicos                                                                                        | 111 |
| 3.1.2 Parámetros geomorfológicos                                                                                    | 113 |
| 3.1.3 Parámetros hidrológicos                                                                                       | 115 |
| 3.1.3.1 Precipitación                                                                                               | 115 |
| 3.1.3.2 Curvas I-D-F                                                                                                | 115 |
| 3.1.3.3 Caudal máximo                                                                                               | 116 |
| 3.1.3.3.1 Método Racional Modificado                                                                                | 116 |
| 3.1.3.3.2 Método Mac Math                                                                                           | 116 |
| 3.1.3.3.3 Método de Iszkowski                                                                                       | 116 |
| 3.2 Modelación de la erosión hídrica con el método USLE                                                             | 117 |
| 3.2.1 Determinar los factores del método de USLE                                                                    | 117 |
| 3.2.1.1 Estimación o determinación del factor R (erosividad de la lluvia)                                           | 117 |
| 3.2.1.2 Estimación del factor K (erodabilidad del suelo)                                                            | 117 |
| 3.2.1.3 Estimación del factor LS (topográfico)                                                                      | 118 |
| 3.2.1.4 Estimación del factor vegetación C                                                                          | 118 |
| 3.2.1.5 Estimación del factor P (prácticas mecánicas)                                                               | 119 |
| 3.2.2 Estimación de la Erosión Hídrica Potencial "Ap"                                                               | 119 |
| 3.2.3 Estimación de la Erosión Hídrica actual "Aa"                                                                  | 119 |
| 3.2.4 Producción de sedimentos                                                                                      | 121 |
| 3.2.4.1 Estimación de aporte de sedimentos                                                                          | 121 |
| 3.2.4.2 Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente                                                      | 122 |
| 3.3 Determinación de los diseños de las prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas en la cuenca de Yucaes | 123 |
| 3.3.1 Diseño del andén                                                                                              | 123 |
| 3.3.2 Diseño de canales de desviación                                                                               | 127 |
| 3.3.3 Diseño de zanjas de infiltración                                                                              | 133 |

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 3.3.4 | Diseño de muros de contención ..... | 136 |
| 3.3.5 | Diseño de cárcavas .....            | 136 |

## **CAPÍTULO IV**

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>DISCUSIONES</b> .....                                                                   | 139 |
| 4.1           Análisis de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos ..... | 139 |
| 4.1.1       Análisis de los parámetros agrológicos .....                                   | 139 |
| 4.1.2       Análisis del los parámetros geomorfológicos .....                              | 139 |
| 4.1.3       Análisis de los parámetros hidrológicos .....                                  | 141 |
| 4.1.3.1     Análisis de la precipitación .....                                             | 141 |
| 4.1.3.2     Análisis de las curvas I-D-F .....                                             | 141 |
| 4.1.3.3     Análisis del caudal máximo .....                                               | 142 |
| 4.2           Análisis de la pérdida de suelo con la USLE .....                            | 142 |
| 4.2.1       Análisis del transporte de sedimento .....                                     | 145 |
| 4.3           Análisis de las prácticas mecánicas de conservación de suelos ....           | 146 |
| 4.3.1       Mejora del agua .....                                                          | 148 |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....                                                                  | 149 |
| <b>RECOMENDACIONES</b> .....                                                               | 151 |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                                                    | 152 |
| <b>ANEXOS</b> .....                                                                        | 161 |

## **ÍNDICE DE TABLAS**

|      |                                                                                                                                                       | Pág. |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1  | Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia = 0.2s) .....   | 19   |
| 1.2  | Valores de C para diferentes cultivos .....                                                                                                           | 45   |
| 1.3  | Firmas espectrales de los poligonos dde uso de suelo y valores correspondientes del factor C .....                                                    | 45   |
| 1.4  | Valores del factor C y P .....                                                                                                                        | 46   |
| 1.5  | Clasificación de la erosión hidrica potencial.....                                                                                                    | 47   |
| 1.6  | Clasificación de la erosión hídrica actual .....                                                                                                      | 47   |
| 1.7  | Contexto geomorfológico y composición del sólido .....                                                                                                | 49   |
| 1.8  | Espaciamientos verticales y horizontales para replantear desviaciones en terrenos de ladera según el porcentaje de pendiente y la precipitación ..... | 64   |
| 1.9  | Valores recomendados para el coeficiente de escorrentía (C) .....                                                                                     | 75   |
| 1.10 | Escurrimiento por las laderas .....                                                                                                                   | 75   |
| 1.11 | Velocidades máximas recomendadas en canales no revestidos ...                                                                                         | 76   |
| 1.12 | Valores de solera o ancho de canal recomendados para diferentes caudales .....                                                                        | 76   |
| 1.13 | Taludes recomendados para diferentes tipos de suelo (Z:1) .....                                                                                       | 76   |
| 1.14 | Pendiente de canal para diferentes tipos de suelos .....                                                                                              | 77   |
| 1.15 | Valores del coeficiente “C” para el cálculo del escurrimiento .....                                                                                   | 80   |

|      |                                                                                                                                                                              |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.16 | Dimensionamiento y capacidad de almacenamiento de la zanja de infiltración .....                                                                                             | 81  |
| 1.17 | Espaciamiento óptimo, en metros, entre diques de retención .....                                                                                                             | 85  |
| 1.18 | Coeficientes de escorrentía para el método racional en función del uso del suelo, clase hidrológica de suelo y pendiente .....                                               | 88  |
| 1.19 | Capacidad de un aliviadero de sección trapezoidal o parabólica en función de su anchura y altura (calado máximo de agua permisible sobre la coronación del aliviadero) ..... | 89  |
| 3.1  | Valores del coeficiente de fricción (hormigón sobre suelo húmedo) .....                                                                                                      | 125 |
| 3.2  | Valores de la resistencia del suelo .....                                                                                                                                    | 127 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|      |                                                                                                                                                                                              | Pág. |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1  | La escorrentía .....                                                                                                                                                                         | 9    |
| 1.2  | Procesos hidrológicos durante una precipitación intensa .....                                                                                                                                | 11   |
| 1.3  | El suelo .....                                                                                                                                                                               | 20   |
| 1.4  | Granulometria del suelo .....                                                                                                                                                                | 21   |
| 1.5  | Denominación de los suelos según la textura .....                                                                                                                                            | 21   |
| 1.6  | Diagrama de erosión pluvial. a) La erosión pluvial, b) Erosión por impacto de las gotas de lluvia (salpique), c) La erosión laminar, que arrastra las partículas del suelo desprendido ..... | 22   |
| 1.7  | Idealización del proceso de erosión en una cuenca .....                                                                                                                                      | 23   |
| 1.8  | Erosión laminar .....                                                                                                                                                                        | 24   |
| 1.9  | Erosión por surcos .....                                                                                                                                                                     | 25   |
| 1.10 | Erosión por cárcavas o zanjas .....                                                                                                                                                          | 25   |
| 1.11 | Factores que intervienen en la erosión hídrica .....                                                                                                                                         | 28   |
| 1.12 | Modelo conceptual para la estimación de los niveles de pérdida de suelo según el método USLE .....                                                                                           | 33   |
| 1.13 | Andenes .....                                                                                                                                                                                | 55   |
| 1.14 | Moray, otro laboratorio agrícola. Foto cortesía de Paranoias .....                                                                                                                           | 57   |
| 1.15 | Complejo Moray .....                                                                                                                                                                         | 57   |
| 1.16 | Sistema de canales de irrigación en laderas .....                                                                                                                                            | 59   |
| 1.17 | Ruinas de Huayanay, Cusco .....                                                                                                                                                              | 59   |
| 1.18 | Partes de un andén .....                                                                                                                                                                     | 60   |
| 1.19 | Parte de los andenes .....                                                                                                                                                                   | 60   |
| 1.20 | Terrazas de arroz en Bali, Indonesia .....                                                                                                                                                   | 62   |
| 1.21 | Parámetros de diseño de un andén .....                                                                                                                                                       | 66   |
| 1.22 | Terrazas de arroz en Banaue, Filipinas .....                                                                                                                                                 | 67   |
| 1.23 | Muro de contención construida con material del lugar .....                                                                                                                                   | 68   |
| 1.24 | Forma de construcción de un muro de contención tipo pirca .....                                                                                                                              | 70   |
| 1.25 | Canal de desviación vista en perfil con Cabuya y Penca al borde .....                                                                                                                        | 73   |
| 1.26 | Zanjas de infiltración vista en perfil forestado con árboles nativos .....                                                                                                                   | 77   |
| 1.27 | Partes de la zanja de infiltración .....                                                                                                                                                     | 80   |
| 1.28 | Esquema conceptual de control de una red de cárcavas .....                                                                                                                                   | 83   |
| 1.29 | Vista de varios diques de retención espaciados .....                                                                                                                                         | 84   |

|      |                                                                |     |
|------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 1.30 | Espaciamiento entre diques de retención (L) .....              | 84  |
| 2.1  | Plano de ubicación .....                                       | 104 |
| 3.1  | Análisis de fuerzas .....                                      | 124 |
| 3.2  | Canal de desviación propuesto .....                            | 128 |
| 3.3  | Sección transversal del canal de desviación. Tramo B - C ..... | 131 |
| 3.4  | Sección transversal del canal de desviación. Tramo C - D ..... | 133 |
| 3.5  | Dimensionamiento de la zanja de infiltración .....             | 135 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|      |                                                                                                     | <b>Pág.</b> |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.1  | Formulario de intensidades .....                                                                    | 12          |
| 1.2  | Factor de escorrentía de Mac Math .....                                                             | 15          |
| 1.3  | Valores de “m” de Iszkowski .....                                                                   | 16          |
| 1.4  | Valores de “C” de Iszkowski .....                                                                   | 17          |
| 1.5  | Daños directos e indirectos causados por la erosión hídrica .....                                   | 31          |
| 1.6  | Clasificación de rangos típicos de R anual .....                                                    | 36          |
| 1.7  | Códigos de estructuras del suelo USLE .....                                                         | 37          |
| 1.8  | Códigos USLE de permeabilidad del suelo .....                                                       | 37          |
| 1.9  | Factor K de acuerdo a la textura del suelo (W.R.B) .....                                            | 40          |
| 1.10 | Erosionabilidad de los suelos (K) en función de la textura y el contenido de materia orgánica ..... | 41          |
| 1.11 | Diseño de un muro tipo pirca .....                                                                  | 71          |
| 2.1  | Accesibilidad a la cuenca de Yucaes .....                                                           | 103         |
| 2.2  | Valores de los coeficientes de confiabilidad tipo dicotómico ....                                   | 107         |
| 3.1  | Tipo de suelos y sus respectivas áreas de la cuenca de Yucaes ....                                  | 111         |
| 3.2  | Características generales de suelos de la cuenca Yucaes .....                                       | 112         |
| 3.3  | Clasificación de capacidad de uso mayor y sus respectivas áreas de la cuenca Yucaes .....           | 112         |
| 3.4  | Resumen de parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Yucaes .....                             | 114         |
| 3.5  | El factor K según el tipo de suelo de la cuenca de Yucaes .....                                     | 118         |
| 3.6  | Clasificación de pendientes .....                                                                   | 120         |
| 3.7  | Recomendación de obras de conservación y protección del suelo en la cuenca de Yucaes .....          | 120         |
| 3.8  | Cargas verticales .....                                                                             | 125         |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|     |                                                            | <b>Pág.</b> |
|-----|------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.1 | Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia .....            | 14          |
| 1.2 | Nomograma del valor de K de Wischmeier y Smith, 1978 ..... | 39          |
| 1.3 | Gráfica para el cálculo de CES (ASCE) .....                | 52          |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|         | <b>Pág.</b>                                                                                       |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8.1     | Matriz de consistencia ..... 162                                                                  |
| 8.2     | Encuesta ..... 164                                                                                |
| 8.3     | Cálculo del coeficiente de confiabilidad de Kuder & Richardson ..... 167                          |
| 8.3.1   | Fórmula de Kuder & Richardson ..... 168                                                           |
| 8.4     | Parámetros geomorfológicos ..... 170                                                              |
| 8.4.1   | Determinación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca de Yucaes ..... 171                  |
| 8.5     | Parámetros hidrológicos ..... 178                                                                 |
| 8.5.1   | Determinación de la Precipitación promedio anual por el método del Polígono de Thiessen ..... 179 |
| 8.5.2   | Curva Intensidad – Duracion – Frecuencia (I-D-F) ..... 180                                        |
| 8.5.3   | Cálculo del caudal máximo ..... 188                                                               |
| 8. 3.1  | Método Racional Modificado ..... 188                                                              |
| 8. 3.2  | Método de Mac Math ..... 189                                                                      |
| 8. 3.3  | Método de Iszkowski ..... 191                                                                     |
| 8.6     | Estimación de la pérdida de suelo con la USLE ..... 192                                           |
| 8.7     | Prueba de Infiltracion del suelo ..... 202                                                        |
| 8.7.1   | La infiltración ..... 203                                                                         |
| 8.7.1.1 | Movimiento del agua ..... 204                                                                     |
| 8.7.1.2 | Descripción del proceso de la infiltración ..... 204                                              |
| 8.7.1.3 | Conceptos relacionados a la infiltración ..... 206                                                |
| 8.7.1.4 | Métodos para medir la velocidad de infiltración ..... 210                                         |
| 8.7.2   | Cálculos y resultados ..... 214                                                                   |
| 8.8     | Panel fotográfico ..... 221                                                                       |
| 8.9     | Planos ..... 234                                                                                  |
| 8.9.1   | Delimitación de la cuenca hidrográfica de Yucaes                                                  |
| 8.9.2   | Mapa de sub áreas de la cuenca                                                                    |
| 8.9.3   | Mapa de la red hidrográfica                                                                       |
| 8.9.4   | Mapa de suelos                                                                                    |
| 8.9.5   | Mapa de capacidad de uso mayor                                                                    |
| 8.9.6   | Mapa de pendientes                                                                                |
| 8.9.7   | Mapa del factor R                                                                                 |
| 8.9.8   | Mapa del factor K                                                                                 |
| 8.9.9   | Mapa del factor LS                                                                                |
| 8.9.10  | Mapa Temático de erosión potencial                                                                |
| 8.9.11  | Mapa Temático de erosión actual                                                                   |

## INDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

|           |                                                                                                                                             |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15        | Archivo con los datos climáticos de la estación meteorológica                                                                               |
| minTA2000 | Torrejón de Ardoz del año 2000, generados con los datos tomados cada 15 minutos                                                             |
| ARS       | Agriculture Research Service                                                                                                                |
| CATIE     | Centro Agronómico Tropical para Investigación y Enseñanza                                                                                   |
| DOI/BLM   | Department of the Interior's Bureau of Land Management                                                                                      |
| MDT ó DEM | Modelo digital del terreno ó Digital Elevation Model                                                                                        |
| EUA       | Estados Unidos de América                                                                                                                   |
| EUPS      | Ecuación Universal de Pérdida de Suelo                                                                                                      |
| EUPSM     | Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada                                                                                           |
| AECI      | Agencia Española de Cooperación Internacional                                                                                               |
| ANSWERS   | Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation                                                                             |
| ASAE      | American Society of Agricultural Engineers                                                                                                  |
| ASCE      | American Society of Civil Engineers                                                                                                         |
| CN        | Curva número                                                                                                                                |
| ES        | Escooentía superficial                                                                                                                      |
| EUROSEM   | European Soil Erosion Model                                                                                                                 |
| FAO       | Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación                                                                   |
| FAO/PNUMA | Food and Agricultural Organization. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente                                                  |
| GPS       | Sistema de posicionamiento Global (Global Positioning System)                                                                               |
| IDEAM     | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales                                                                                |
| IMF       | Es el índice modificado de Fournier;                                                                                                        |
| INEGI     | Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática                                                                                   |
| MINAGRI   | Ministerio de Agricultura                                                                                                                   |
| MUSLE     | Modified Universal Soil Loss Equation. (Williams, 1995)                                                                                     |
| N-SPECT   | Herramienta para la Comparación de la Descarga de Contaminantes y Erosión (Nonpoint-Source Pollution and Erosion Comparison Tool (N-SPECT)) |
| O.D.S     | Objetivos de desarrollo sostenible                                                                                                          |
| P.M.A     | Precipitación media anual                                                                                                                   |
| PNUMA     | Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente                                                                                      |
| P.S       | Pérdida de suelo                                                                                                                            |
| RUSLE     | Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al. 1991)                                 |
| SAGARPA   | Secretaría de agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación                                                                |
| SENAMHI   | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú                                                                                     |
| SICS      | Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo                                                                                            |
| SCS       | Servicio de conservación de suelos                                                                                                          |
| SCS       | Soil Conservation Service                                                                                                                   |
| S.C y C   | Sociedad civil y de comunidades                                                                                                             |

|          |                                                                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SOTERLAC | Base de Datos de Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe<br>(Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean) |
| TIG      | Tecnologías de información geográfica                                                                                               |
| T.R.S    | Tasa de recuperación del suelo                                                                                                      |
| T.F.S    | Tasa de formación de suelo                                                                                                          |
| TSS      | Total de Sólidos Suspendidos (Total Suspended Solids)                                                                               |
| UNESCO   | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura                                                      |
| USAID    | Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional<br>(United States Agency for International Development)              |
| USBR     | United States Bureau of Reclamation                                                                                                 |
| USDA     | United States Department of Agriculture, Forest Service<br>(Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)                      |
| USLE     | Universal Soil Loss Equation (Wischmeier y Smith, 1978)                                                                             |
| USPED    | Modelación espacial de la erosión y deposición                                                                                      |
| WEPP     | Water Erosion Prediction Project                                                                                                    |
| WRB      | World Reference Base for Soil Resources                                                                                             |
| WRI      | Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute)                                                                         |

#### Unidades

1 libra = 453.59 gramos

## RESUMEN

El estudio tuvo como objetivos evaluar los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos, el modelo USLE en la estimación de la pérdida de suelo y los diseños mecánico - estructurales en la conservación del suelo y el agua de la cuenca de Yucaes. En el análisis descriptivo y comparativo de las ecuaciones seleccionadas se determinó que las pérdidas de suelo por erosión hídrica estimadas con la ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE), utilizando la ecuación de erosividad de la lluvia, obtenida con datos de otras localidades, proporcionó valores que se ajustan bien a los valores registrados en el área de estudio, con ligeras variaciones. El cambio de uso de suelo, en detrimento de la cubierta vegetal, es la principal causa de erosión hídrica en la cuenca. Uno de los factores que afectan el funcionamiento hidrológico de la cuenca es la pérdida de suelo por erosión hídrica, lo cual disminuye la calidad y cantidad del recurso agua captado por la cuenca.. Para la determinación de la pérdida de suelos se consideraron los factores: R, K, LS, C, P, utilizando los parámetros agrológicos, geomormológicos e hidrológicos de la cuenca de Yucaes. También se determinaron las curvas Intensidad, duración y frecuencia (I-D-F) y por varios métodos (método racional modificado, método de Mac Math, método de Iszkowski el promedio del caudal máximo para la zona de estudio es de 244.89 m<sup>3</sup>/s, la estimación de la tasa promedio anual de erosión potencial de 354.40 ton/ha\*año y de una tasa promedio anual de erosión actual de 71.45 ton/ha\*año considerando un riesgo de erosión laminar fuerte según propuesta de la FAO (1980), concentrándose en la parte alta y media de la cuenca. El aporte de sedimentos en el río, se ha obtenido de un promedio de metodos empíricos de aproximadamente:  $Y = 12.33 \text{ ton./ha*año}$ ) y la capacidad de transporte de la corriente de agua fue de aproximadamente 2.88 m<sup>3</sup>/s. También para la mejora y conservación del agua y del suelo se proponen en la investigación el diseño de las prácticas mecánicas (canales de desviación, zanjias de infiltración y terrazas o andenes). Además se ha determinado que la investigación por el método de Kuder & Richardson ( $KR20 = 0.64$ ) tiene una alta confiabilidad el trabajo de investigación.

**Palabras claves:** aporte de sedimento, ecuación universal de de la pérdida de suelos, erosión hídrica, erosión potencial y actual, cuenca.

## INTRODUCCIÓN

La erosión constituye uno de los problemas medioambientales y socioeconómicos más importantes a nivel global del siglo XXI. Se estima que una sexta parte del suelo mundial se encuentra afectado por erosión hídrica; Walling y Fang (2003).

La erosión del suelo es la mayor amenaza ambiental a la sostenibilidad y capacidad productiva agrícola. Durante los últimos 40 años, cerca de un 1/3 de la tierra arable en el mundo se ha perdido por la acción de la erosión y se continúa perdiendo a una razón mayor de 10 millones de hectáreas o 25.4 millones de cuerdas por año. Con la adición de ¼ de millón (250 mil) personas por día, la demanda de la población mundial por comida va en aumento en un momento cuando la productividad per cápita de alimento comienza a decaer; Pimentel et al (1995).

La lluvia es el factor determinante en los procesos de erosión hídrica. Su caracterización física, a través de los parámetros indicados de intensidad, duración y frecuencia, ha permitido que algunos investigadores definan el umbral de intensidad donde la lluvia se considera erosiva. Así, algunos investigadores estiman que todo evento pluvial con intensidad menor de  $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  no es erosivo; Hudson (1971).

Debido al desequilibrio que presentan estas zonas entre la tasa de formación y pérdida del suelo y a las pérdidas económicas que este fenómeno conlleva, durante las últimas décadas se han impulsado numerosas estrategias y programas de prevención de la erosión con el fin de asegurar un uso sostenible del suelo.

Es en este ámbito donde la cartografía de riesgos de erosión del suelo se está convirtiendo cada vez más en una necesidad a la hora de realizar una planificación sostenible en la ordenación del territorio; Dumas (2012).

El problema de la erosión requiere el reconocimiento de los procesos erosivos y el estudio de sus factores causales, para establecer políticas de conservación; Fournier (1972).

La incorporación de las técnicas de conservación de aguas y suelos demanda un importante esfuerzo técnico y económico, por lo que los conocimientos referentes a esta temática y los estudios que se han realizado al respecto, son escasos; Pizarro (2003).

Barahona (2006), menciona, que la problemática en las cuencas, en la mayoría de los casos, es el resultado de acciones antropogénicas que posteriormente se revierten en contra del hombre.

"Una nación que destruye sus suelos se destruye a sí misma" Franklin D. Roosevelt.

### **Descripción del problema**

La erosión hídrica es un problema que trae como consecuencia una menor producción agrícola al producirse un deterioro del potencial económico de éste espacio abiótico. También, el problema es las inapropiadas prácticas agrícolas del recurso suelo se va degradando. Así tenemos:

Debido a la inadecuada intervención del hombre la que comienza a producirse una erosión acelerada que impide que el suelo se regenere.

La pérdida de suelos por erosión agrava el problema, ya que, ante un crecimiento dinámico de la población, existe un crecimiento relativamente estático de los recursos naturales.

### **Justificación del proyecto**

La pérdida de suelo por la erosión hídrica en la cuenca se considera hoy en día como un principal problema medioambiental a nivel global, asociado, en gran medida, a la deforestación, teniendo un efecto negativo en la productividad, biodiversidad y sostenibilidad agrícola.

Las tasas de erosión intolerables que pueden poner en riesgo la sostenibilidad de este recurso no renovable y que es soporte para múltiples actividades que realiza el hombre para su calidad de vida.

La falta de obras de conservación de suelos y manejo del agua.

### **Objetivos**

Se tienen los siguientes objetivos planteados:

#### **Objetivo General**

Determinar y analizar la erosión hídrica para un manejo adecuado del recurso suelo y del agua en la cuenca de Yucaes.

#### **Objetivos específicos**

1. Determinar los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca Yucaes.
2. Realizar la modelación de la erosión hídrica con el método USLE.
3. Diseñar prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas para el control de la erosión hídrica en la cuenca de Yucaes.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Antecedentes**

Wischmeier (1955), quien pone en marcha un estudio a escala nacional usando modernas técnicas de análisis para correlacionar los resultados de todos los experimentos de campo. Es este investigador y sus colaboradores quienes identifican y cuantifican los factores responsables de la erosión hídrica, publicando en 1958 “Evaluation of factors in the Soil-Loss Equation”, la actual ecuación predictiva conocida como Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS).

En un estudio realizado en un suelo Sparovek et al (1990), llegaron a la conclusión de que el rendimiento está relacionado directamente con la profundidad del suelo remanente después de la remoción de la capa superficial más rica en nutrientes.

El efecto de la degradación del suelo debido a su remoción artificial, puede ser observado desde los primeros estados de crecimiento de los cultivos porque provoca la disminución del vigor de las plantas, disminución de la altura de crecimiento y prolongación de los estados de desarrollo; May y Souza (1990).

Con base en los análisis de la investigación realizada por Cortes (1991), se enfatizan los siguientes aspectos: La precipitación pluvial, la lluvia fue la variable más dinámica en la erosión registrada. A su vez, influyó en la saturación hídrica del suelo, en la escorrentía y, como resultado, en el volumen de suelo perdido por erosión. La lluvia fue responsable en el 76,7 por ciento de los casos en que ocurrió erosión, como variable única, o asociada estrechamente a la saturación hídrica.

El establecimiento de una metodología para evaluar la degradación de suelos es un tema más complejo y la intensa labor llevada a cabo durante los últimos veinte años por diferentes organismos internacionales por ejemplo; FAO (1979), FAO-UNEP (1984), Oldeman et al (1991), contrasta con los escasos resultados obtenidos, no

existiendo en la actualidad criterios satisfactorios globalmente aceptados, ni, sobre todo, estudios de detalle que hayan permitido una correcta valoración de los diferentes procesos de degradación.

Independientemente de cuál sea el método seguido y la escala empleada en la evaluación de la degradación de los suelos de un territorio, sí parece claro que, siguiendo el esquema propuesto por Lal et al (1989), los principales procesos de degradación pueden agruparse en:

Procesos de degradación física, que afectan a las principales propiedades físicas del suelo que mayor influencia tienen en su funcionamiento hídrico y atmosférico.

- Erosión acelerada, tanto hídrica como eólica.
- Degradación de la estructura, incluyendo la formación de costras de sellado superficiales, la compactación y el encharcamiento.
- Procesos de degradación química, relacionados con el deterioro de las características químicas que influyen en la fertilidad de los suelos y por tanto en su funcionamiento productivo y biosférico (capacidad para producir biomasa).
  - Salinización y sodificación.
  - Acidificación y desbasificación.
  - Contaminación.
- Procesos de degradación biológica, que hacen referencia al deterioro de los procesos bióticos en el suelo y a la disminución de las fracciones orgánicas de los mismos.
  - Reducción del contenido en materia orgánica.
  - Disminución del carbono ligado a la biomasa.
  - Reducción de la actividad de los microorganismos.
  - Pérdida de biodiversidad edáfica.
  - Alteración de los procesos biológicos.

Entre los factores antrópicos, la roturación y manejo de suelos en zonas de pendiente elevada, es uno de los más importantes agravado en los últimos años por el abandono de los cultivos y la formación de costras de sellado y otras formas de degradación al cesar el laboreo.

El pastoreo caprino en régimen extensivo, principalmente en Fuerteventura, es otro de los factores que más contribuyen a dejar los suelos expuestos a la acción del viento y la lluvia; Rodríguez et al (1990). La intensa deforestación sufrida por los bosques en

los sectores de mayor relieve de las islas, ha hecho que no sólo se elimine el efecto amortiguador de las gotas de lluvia, sino que también se reduce la infiltración aumentando la escorrentía y la erosión.

## **1.2 Estudio hidrológico en cuencas**

### **1.2.1 Cuenca hidrográfica**

#### **1.2.1.1 Conceptos generales**

Breña (2006), la cuenca es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología.

#### **1.2.1.2 Características fisiográficas**

En general, para estudiar una cuenca hidrológica se requieren métodos cuantitativos y cualitativos. En el primer caso, es fundamental definir parámetros que representen algunas características particulares importantes, que pueden ofrecer una información relevante acerca de las variables y los procesos hidrológicos.

Es de nuestro conocimiento que el movimiento del agua en la naturaleza es una función compleja en la cual intervienen diversos factores, entre los cuales se pueden resaltar su clima y sus características fisiográficas. Uno de los aspectos más importantes en el análisis hídrico es la morfometría de la cuenca; Gregory and Walling (1985), puesto que, permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico.

Para el estudio y determinación de los parámetros geomorfológicos se precisa de la información cartográfica de la topografía, del uso del suelo y de la permeabilidad de la región en estudio.

Algunos de los parámetros característicos de mayor interés se presentan a continuación:

**a. Área, perímetro y perfil longitudinal de la cuenca**

Actualmente, el área, el perímetro, el perfil longitudinal, etc., de cualquier cuenca puede ser calculada fácil y rápidamente usando software como el AutoCAD, Arcview, etc.

El área de la cuenca es un dato de referencia muy importante en Hidrología. Dividiendo los caudales medidos de una sección determinada para la correspondiente cuenca se obtienen los caudales específicos o rendimientos, expresados generalmente en litros por segundo por kilómetro cuadrado. Generalmente los valores oscilan entre 5 y 30 l/seg./Km<sup>2</sup>.

Se calcula dividiendo los caudales mínimos mensuales para la superficie de la cuenca.

**b. Pendiente de la cuenca**

La pendiente de una cuenca es un parámetro muy importante en el estudio de toda cuenca. Así tenemos que tiene gran influencia en el escurrimiento de la corriente, ya que a mayor pendiente de la cuenca hay mayor rapidez en el viaje de la esorrentía, de modo que los caudales picos son mayores y la infiltración tiende a ser menor.

Permite conocer el tiempo de concentración de las aguas en un determinado punto del cauce y su determinación, no es de una sencillez su ejecución, existiendo para ello una serie de criterios debido a que dentro de la una cuenca existen innumerables pendientes.

**c. La estructura de la red de drenaje**

El análisis cuantitativo de redes hidrográficas, se basa en el método de Horton (1945) de clasificación de la red de drenaje.

Horton (1945) propuso un esquema de ordenamiento para la red de drenaje, con base en este ordenamiento, encontró algunas regularidades existentes en la red de drenaje, relacionados con la estructura de bifurcación y su distribución espacial. Los primeros resultados empíricos sobre éstas regularidades, se conocen como las leyes de Horton: Las llamadas ley de los números de corrientes y ley de las longitudes de corriente.

#### **d. Densidad de corrientes, densidad de la red de los cauces o frecuencia de ríos**

Esta característica es un indicador de la eficiencia de drenaje de una cuenca, puede ocurrir que se tenga dos cuencas diferentes con la misma densidad de corrientes y éstas drenadas en diferentes formas, dependiendo de la longitud y disposición de sus corrientes. La densidad de corriente se representa como la relación existente entre el número de corrientes de la cuenca ( $N_c$ ) y el área drenada ( $A$ ); es decir:

$$D_c = \frac{N_c}{A}$$

Dónde

$D_c$  = Densidad de corrientes.

$A$  = Área de la cuenca.

$N_c$  = Número de corrientes permanentes e intermitentes.

La corriente principal se cuenta como una sola desde su nacimiento hasta su desembocadura, después se tendrán todos los tributarios de orden inferior desde su origen hasta la unión de la corriente principal y así sucesivamente hasta llegar a las corrientes de orden 1.

#### **e. Densidad de drenaje**

La cantidad de ríos y quebradas que llegan o tributan al río principal dentro del área de la cuenca se conoce como densidad de drenaje. Este es un parámetro revelador del régimen y de la morfología de la cuenca. Es una característica más real y confiable que la densidad de corriente, siendo un parámetro que se obtiene dividiendo la longitud total de las corrientes permanentes e intermitentes de la cuenca por unidad de área. De la fórmula:

$$D_d = \frac{L_c}{A}$$

Dónde:

$D_d$  = Densidad de drenaje por Km.

$L_c$  = Longitud total de las corrientes, en Km.

$A$  = Área de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un aguacero, y, por tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desague de la cuenca.

A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma.

#### 1.2.1.2.1 Tiempo de concentración (Tc)

Se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Se determina mediante fórmulas experimentales.

Este parámetro es muy importante, por ejemplo para calcular los caudales máximos o de diseño de las principales estructuras hidráulicas. Se expresa:

$$T_c = 0.01945 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

Dónde:

Tc = Tiempo de concentración en minutos.

L = Longitud máxima del recorrido del agua, en m.

H = Diferencia de altura entre el punto más remoto y el punto de desagüe, en m.

#### 1.2.2 Escorrentía o escurrimiento superficial

Se define, como la circulación libre del agua de lluvia sobre la superficie del terreno (figura 1.1)



Figura 1.1 La escorrentía

(Diccionario ilustrado de la lengua española VOX)

El proceso de escurrimiento superficial (ES) sin control constituye un problema ambiental crítico, favorece la erosión hídrica del suelo, aumenta el caudal, la carga de sedimentos y de otros contaminantes en el agua.

La escorrentía es una fase del ciclo hidrológico. Recuérdesse que el agua pasa de ser el vapor de agua contenido dentro de las masas de aire de la atmósfera, para luego convertirse en precipitación o lluvia. A su vez, el agua se evapora directamente desde el suelo, o es liberada en forma de vapor a través de las plantas (evapotranspiración). Otra parte del agua es infiltrada a través del suelo para alimentar a las aguas freáticas o subterráneas. Las aguas que logran mantenerse en movimiento sobre la superficie se convierten entonces en aguas de escorrentía. Cita web (7).

Las aguas de escorrentía son de vital importancia para el hombre, puesto que sin este recurso las actividades humanas se ven seriamente restringidas. Así, por ejemplo, muchas de las antiguas civilizaciones se desarrollaron en torno a grandes ejes de drenaje, pues el agua corriente se utiliza para el riego de los cultivos; es útil en las actividades manufactureras; sirve para el consumo de las comunidades urbanas; por otra parte, la escorrentía alimenta los grandes embalses que son útiles para la generación de energía eléctrica; los grandes ríos sirven, además, para la navegación, convirtiéndose en especies de autopistas por donde circulan numerosas embarcaciones, y son, al mismo tiempo, importantes para la pesca, por ser el hábitat de múltiples especies comestibles.

Los principales agentes causantes de la erosión hídrica son la energía cinética de las precipitaciones y el agua que circula por la superficie, que con una cierta velocidad crítica desprende y pone en movimiento a las partículas del suelo. El escurrimiento superficial es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico. La diferencia entre la precipitación total y la interceptada es la precipitación que llega al suelo. Si ésta supera la capacidad de infiltración y retención se forma una delgada lámina de agua que comienza a correr por gravedad a través de la pendiente.

La diferencia entre la intensidad de lluvia (mm/h) y la capacidad de infiltración es el exceso de lluvia para producir el escurrimiento superficial (figura 2.1). Cisneros (2012).

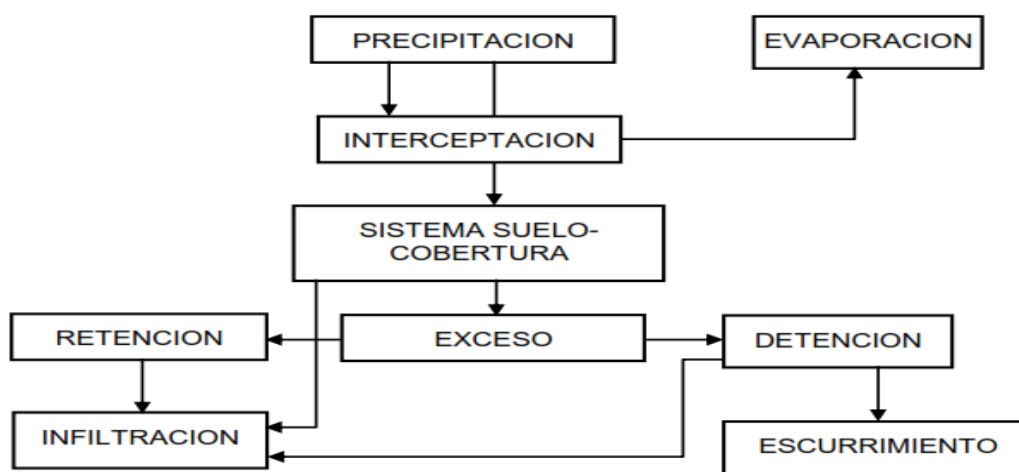


Figura 1.2 Procesos hidrológicos durante una precipitación intensa

Fuente: Cisnero (2012)

### 1.2.2.1 Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, son una de las herramientas más útiles para el diseño hidrológico de caudales máximos, cuando se utilizan modelos lluvia-escorrentía como los hidrogramas unitarios o el método racional; Nanía (2003). Es así como un gran número de proyectos hidrológicos, como el diseño de evacuadores de crecidas, construcción de puentes, construcción de redes de drenaje, entre otros, se define en relación con la máxima precipitación que se podría esperar para un determinado período de retorno. A partir de estos eventos extremos, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y de riesgo; Llamas (1993), Asociación Catalana de Ingeniería Sin Fronteras (2002).

Por otra parte, las curvas I-D-F son de gran ayuda en la construcción de obras de control de erosión y recuperación de suelos degradados. En obras como zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de postes, gaviones y otras destinadas al control de cárcavas y procesos erosivos en laderas, se hace necesario conocer los máximos valores de intensidades de precipitación que se pueden alcanzar, con el fin de dimensionar dichas obras; Pizarro et al (2001).

Sin duda una particularidad de las Curvas I-D-F, es que se pueden expresar como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de las intensidades de precipitación en una gráfica; Chow et al (1994).

Para Remenieras (1971), estos modelos han conducido a numerosos investigadores del mundo a generar diversas expresiones matemáticas que simulan las curvas I-D-F, las que se presentan en el cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Formulario de intensidades

$$I = \frac{K * T^m}{(D + b)^n} \quad \text{Modelo propuesto por Sherman (1931)}$$

$$I = \frac{K * T^m}{D^n} \quad \text{Modelo propuesto por Bernard (1932)}$$

$$I = \frac{a}{D + b} \quad \text{Modelo propuesto por Linsley et al (1949), para duraciones entre 5 y 20 minutos}$$

$$I = \frac{c}{D^n} \quad \text{Modelo propuesto por Linsley et al (1949), para duraciones superiores a 60 minutos.}$$

$$I = \frac{K}{D^n + b} \quad \text{Modelo propuesto por Wenzel (1982)}$$

$$I = i_1^T * \frac{a}{(D + b)^c} \quad \text{Modelo propuesto por Chen (1983)}$$

$$I = \frac{KT^m}{D^n + b} \quad \text{Modelo propuesto por Chow et al (1994)}$$

$$I = K * \left\{ \frac{m - \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(D + b)^n} \right\} \quad \text{Modelo propuesto por Koutsoyiannis et al (1998)}$$

Donde a, b, c, K, m, n y b son parámetros adimensionales, es la intensidad media de la lluvia de una hora y período de retorno de T años, T es periodo de retorno, D es la duración e I la intensidad máxima de precipitación.

Fuente: Remenieras (1971)

### 1.2.2.2 Periodo de retorno

GITS (2007), las curvas I-D-F, nos permite predecir cuándo podrá caer la lluvia en el futuro. Es importante para poder averiguar los caudales de agua que producen las cuencas en eventos extremos de manera que se pueda diseñar las obras de contención, drenaje de carreteras, alcantarillas y otras infraestructuras urbanas. El problema es que

el evento lluvia es un evento aleatorio y para estudiar su evolución y predicción ha de realizarse mediante conceptos probabilísticos.

Las curvas I-D-F pretenden exactamente eso, asociar la intensidad con la duración de la lluvia y la probabilidad de ocurrencia o frecuencia. Una de las fórmulas más utilizadas para asignar periodos de retorno a eventos es la expresión:

$$T = \frac{(n+1)}{m}$$

Siendo m el número de orden y n el número total de datos.

### 1.2.2.3 Riesgo

Muchas veces es necesario expresar el riesgo de una situación.

Si la probabilidad de que un evento sea superado en un año cualquiera es:

$$P=1/T$$

Entonces la probabilidad de que el evento no sea superado en un año determinado es:

$$\bar{P} = 1 - \frac{1}{T}$$

Así la probabilidad de que el evento no sea superado en los próximos n años es:

$$\underbrace{\bar{P}\bar{P}\bar{P}\bar{P} \dots \dots \bar{P}}_{n \text{ veces}} = \bar{P}^n = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Por lo que la probabilidad de que el evento sea superado al menos una vez en n años sucesivos es:

$$R = 1 - \bar{P}^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

### 1.2.2.4 Caudales

Trata sobre la determinación del caudal máximo probable de escorrentía. Es necesario para diseñar canales, drenajes o alcantarillas, o para calcular los niveles máximos de inundación. Se describe un métodos empíricos propuesto por la FAO (1997), se observa en el gráfico 1.1.

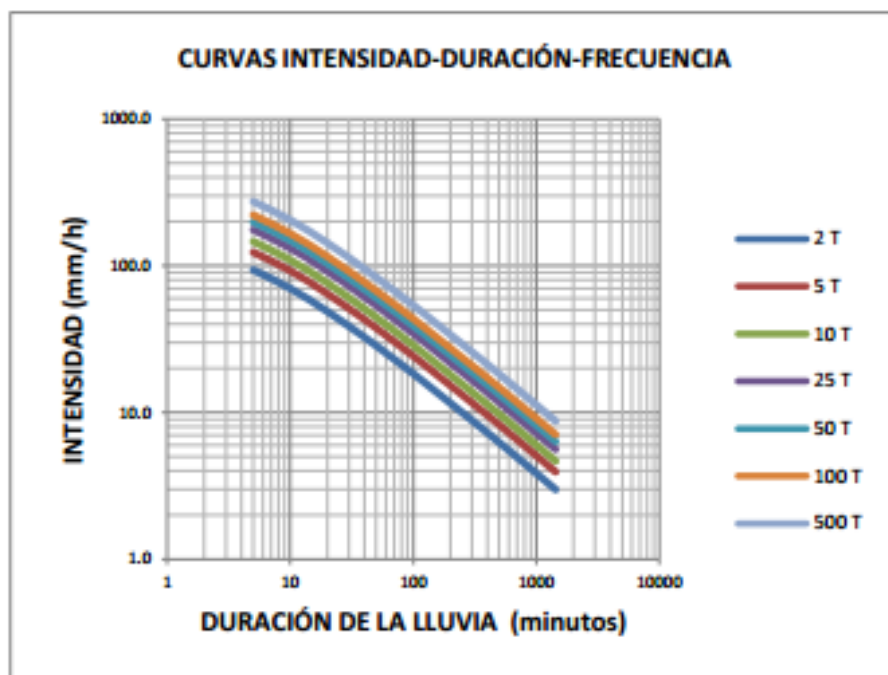


Gráfico 1.1 Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

Fuente: FAO (1997)

Así mismo para el presente estudio se proponen los siguientes métodos:

#### 1.2.2.4.1 El Método Racional Modificado

La fórmula racional; MTC (s.f.) está expresada de la siguiente manera:

$$Q = 0.278 * C * I * A * K$$

Dónde:

Q = Caudal en metros cúbicos por segundo,

I = Intensidad en milímetros por hora,

A = Superficie de la cuenca en hectáreas,

C = Coeficiente de escorrentía sin dimensiones.

K = Coeficiente de uniformidad

$$K = 1 + \frac{T_C^{1.25}}{T_C^{1.25} + 14}$$

Tc = tiempo de concentración (horas)

Y permite estimar de forma sencilla caudales punta en cuencas de drenaje naturales con áreas menores de 770 km<sup>2</sup> y con tiempos de concentración (T<sub>c</sub>) de entre 0.25 y 24 horas.

#### 1.2.2.4.2 Método de Mac Math

$$Q = 0.0091 * C * I * A^{\frac{4}{5}} * S^{\frac{1}{5}}$$

Dónde:

Q = Caudal máximo con un periodo de retorno de T años, en m<sup>3</sup>/s.

C = Factor de escorrentía de Mac Math, representa las características de la cuenca en el cuadro 1.2.

I = Intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración T<sub>c</sub> y un periodo de retorno de T años mm/hr.

A = Área de la cuenca en Has.

S = Pendiente promedio del cauce principal en ‰.

#### - Factor de Escorrentía de Mac Math

De los parámetros que intervienen en esta fórmula, sobre el que se tiene que incidir, es decir, es sobre el factores C, el cual se compone de las tres componentes, es decir

$$C = C1 + C2 + C3$$

Donde

C1 = Esta en función de la cobertura vegetal

C2 = Esta en función de la textura del suelo

C3 = Esta en función de la topografía del terreno

Cuadro 1.2 Factor de escorrentía de Mac Math

| Vegetación |      | Suelo   |      | Topografía    |      |
|------------|------|---------|------|---------------|------|
| Cobertura  | C1   | Textura | C2   | Pendiente (%) | C3   |
| 100        | 0.08 | arenoso | 0.08 | 0.0-0.2       | 0.04 |
| 80-100     | 0.12 | ligera  | 0.12 | 0.2-0.5       | 0.06 |
| 50-80      | 0.16 | media   | 0.16 | 0.5-2.0       | 0.06 |
| 20-50      | 0.22 | finas   | 0.22 | 2.0-5.0       | 0.10 |
| 0-20       | 0.30 | rocosa  | 0.30 | 5.0-10        | 0.15 |

Fuente: Villón (2002)

### 1.2.2.4.3 Método de Iszkowski

El gasto máximo se determina en función de las características fisiográficas del suelo, de la precipitación y el área y está expresada por la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{máx}} = m * C * A * p * 10^{-3} \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

Dónde:

$m$  y  $C$  : Son constantes proporcionadas en los cuadros 1.3 y 1.4 que dependen del tamaño del área de la cuenca y de las características del suelo y de la topografía.

$C$ : Coeficiente de escurrimiento.

$A$ : Área de la cuenca, en  $km^2$ .

$p$ : Precipitación promedio, en  $mm/año$ .

Cuadro 1.3 Valores de “ $m$ ” de Iszkowski

| A (Km <sup>2</sup> ) | m    | A (Km <sup>2</sup> ) | m    |
|----------------------|------|----------------------|------|
| 1                    | 10.0 | 500                  | 4.90 |
| 10                   | 9.50 | 1,000                | 4.70 |
| 20                   | 9.00 | 1,200                | 4.51 |
| 30                   | 8.50 | 1,500                | 4.15 |
| 40                   | 8.23 | 5,000                | 3.13 |
| 50                   | 7.99 | 10,000               | 3.02 |
| 100                  | 7.40 | 50,000               | 2.58 |
| 200                  | 6.87 | 100,000              | 2.05 |
| 300                  | 6.55 | 200,000              | 1.33 |
| 400                  | 6.22 | 350,000              | 1.00 |

Fuente: Pinto (1976)

Cuadro 1.4 Valores de “C” de Iszkowski

| Características del suelo con relación a la topografía   | Clases de suelos |       |       |       |
|----------------------------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|
|                                                          | I                | II    | III   | IV    |
| Zonas planas y bajas                                     | 0.017            | 0.030 | --    | --    |
| Zonas bajas con elevaciones planas y escalonadas (punas) | 0.025            | 0.040 | --    | --    |
| Mezcla de zonas planas y escalonadas                     | 0.030            | 0.050 | --    | --    |
| Zonas escalonadas de poca pendiente (punas)              | 0.035            | 0.070 | 0.125 | --    |
| Zonas escalonadas de pie de monte                        | 0.040            | 0.082 | 0.155 | 0.400 |
| Zonas de pie de monte muy escalonadas                    | 0.045            | 0.100 | 0.190 | 0.450 |
| Zonas de puna de mediana a gran pendiente                | 0.050            | 0.120 | 0.225 | 0.500 |
| Zona montañosa de gran pendiente                         | 0.055            | 0.160 | 0.360 | 0.600 |
| Zona montañosa muy escabrosa                             | 0.080            | 0.210 | 0.600 | 0.800 |

Fuente: Pinto (1976)

### 1.2.2.5 Determinación de la escorrentía directa de una tormenta

#### Método del número de curva de escorrentía

- Método empírico, elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (1985).
- Calcula la escorrentía producida por una determinada precipitación en función del parámetro “número de curva”, que a su vez depende de las condiciones de infiltración de la zona en que se produce la tormenta.
- El “número de curva” se calcula a partir de una serie de tablas y gráficos, obtenidos en parcelas experimentales con diversidad de condiciones de suelo, vegetación y condiciones de infiltración, con simulaciones de precipitaciones en 24 horas.

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

$$I_a = 0.2 * S$$

$$Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{(P + 0.8 * S)} \quad \text{ec. 1.1}$$

Q = Escorrentía directa en mm.

Las curvas representativas de complejos hidrológicos suelo-vegetación se numeran, por comodidad, de 100 a cero. Los números se relacionan a S como sigue:

$$\text{Número de la curva (CN)} = \frac{1000}{10 + S}$$

Despejando S:

$$S = \frac{1000 - 10CN}{CN} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{ec. 1.2}$$

S = Retención potencial máxima en pulgadas.

El problema consiste en averiguar la escurrentía directa Q, en una cuenca a la que corresponde el número de curva CN, debido a una precipitación intensa y prolongada P. De manera que la solución se logra hallando S con la ecuación (1.2) y usando este valor en la ecuación (1.1).

#### - Número de curva de escurrentía

Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco 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 varios tipos de uso de la tierra en estos tipos de suelos se muestran en la tabla 1.1. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular una CN compuesto.

Tabla 1.1 Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia = 0.2s)

| Descripción del uso de la tierra                                      | Grupo hidrológico del suelo |    |    |    |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|----|----|
|                                                                       | A                           | B  | C  | D  |
| Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación      | 72                          | 81 | 88 | 91 |
| con tratamiento de conservación                                       | 62                          | 71 | 78 | 81 |
| Pastizales: condiciones pobres                                        | 68                          | 79 | 86 | 89 |
| condiciones óptimas                                                   | 39                          | 61 | 74 | 80 |
| Vegas de ríos: condiciones óptimas                                    | 30                          | 58 | 71 | 78 |
| Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,               | 45                          | 66 | 77 | 83 |
| cubierta buena <sup>2</sup>                                           | 25                          | 55 | 70 | 77 |
| Área abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, 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 <sup>3</sup> :                                            |                             |    |    |    |
| Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup> |                             |    |    |    |
| 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 |
| Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc. <sup>5</sup>         | 98                          | 98 | 98 | 98 |
| Calles y carreteras:                                                  |                             |    |    |    |
| Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>5</sup>               | 98                          | 98 | 98 | 98 |
| Grava                                                                 | 76                          | 85 | 89 | 91 |
| Tierra                                                                | 72                          | 82 | 87 | 89 |

1. Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972.

2. Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3. Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los sucesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5. En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje (s.f.)

### 1.3 Erosión hídrica

#### 1.3.1 El suelo. Textura

Se conoce como suelo la parte superficial de la corteza terrestre, conformada por minerales y partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento el agua y procesos de desintegración orgánica.

Los suelos no siempre son iguales cambian de un lugar a otro por razones climáticas y ambientales, de igual forma los suelos cambian su estructura, estas variaciones son lentas y graduales excepto las originadas por desastres naturales.

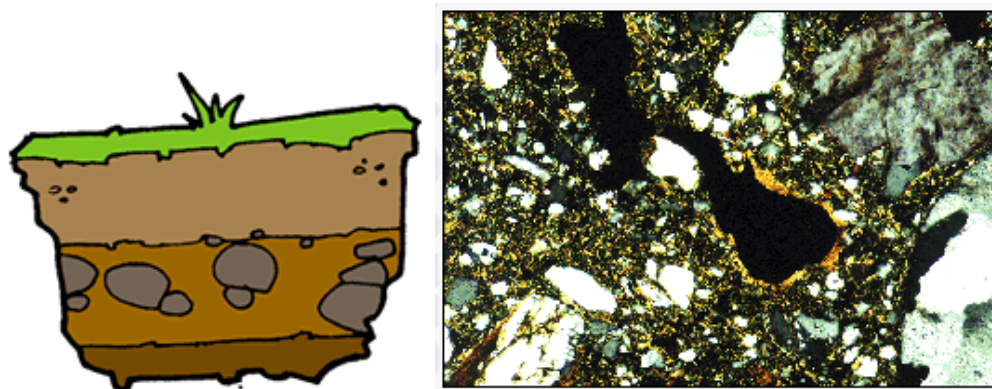


Figura 1.3 El suelo

Fuente: Cita web (22)

##### 1.3.1.1 Importancia de la granulometría

Conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo y su aplicación en ingeniería. Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. De todas estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional (llamada así por haber sido aceptada por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) y la americana del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) las más ampliamente utilizadas, se muestra en la siguiente figura.

| INTERNACIONAL |       |              |            |      |         |    |
|---------------|-------|--------------|------------|------|---------|----|
| piedra        | grava | arena gruesa | arena fina | limo | arcilla |    |
|               | 20    | 2            | 0,2        | 0,02 | 0,002   | mm |

| USDA   |       |            |        |       |      |          |
|--------|-------|------------|--------|-------|------|----------|
| piedra | grava | arenas     |        |       |      |          |
|        | 20    | muy gruesa | gruesa | media | fina | muy fina |
|        |       | 2          | 1      | 0,5   | 0,25 | 0,1      |
|        |       |            |        |       |      | 0,05     |
|        |       |            |        |       |      | limo     |
|        |       |            |        |       |      | 0,002    |
|        |       |            |        |       |      | arcilla  |
|        |       |            |        |       |      | mm       |

Figura 1.4 Granulometría del suelo

Fuente: Cita web (22)

El término textura se usa para representar la composición granulométrica del suelo. Cada termino textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos en gravas; se refieren a la fracción del suelo que se estudia en el laboratorio de análisis de suelos y que se conoce como tierra fina. Por ejemplo, un suelo que contiene un 25% de arena, 25% de limo y 50% de arcilla se dice que tiene una textura arcillosa. Los términos texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones, se muestra en la figura 1.5; cita web (22).

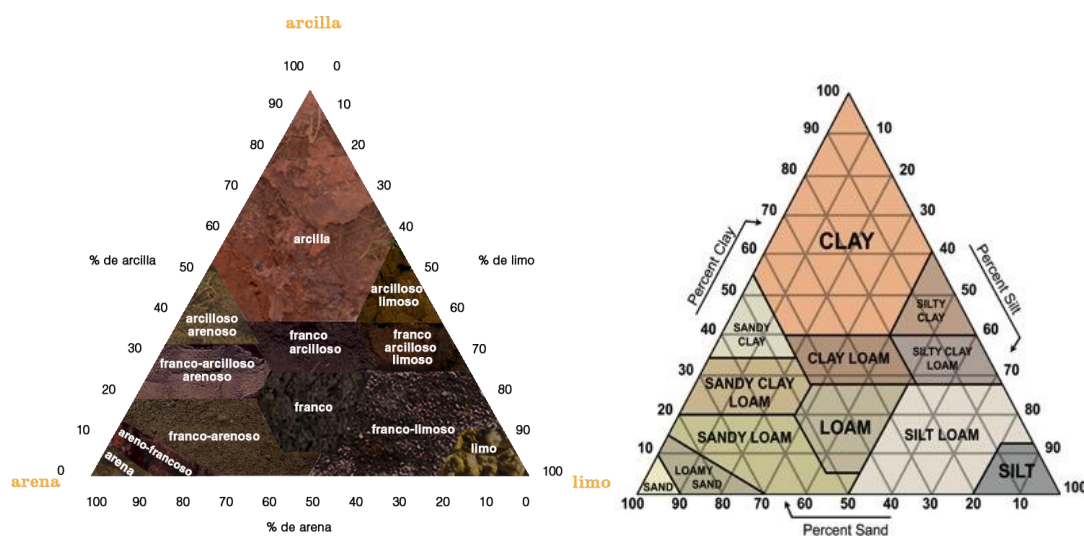


Figura 1.5 Triangulo de textura del suelos

Fuente: Cita web (22)

### 1.3.2 Erosión del suelo

El suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo provocado por agentes erosivos; Ellison (1947). Los agentes

erosivos dinámicos, en el caso de la erosión hídrica son la lluvia y el escurrimiento superficial o las inundaciones.

Para que exista erosión hídrica debe haber desagregación (por impacto de la gota de lluvia sobre el suelo) y transporte de partículas por un flujo superficial. Deben manifestarse ambos fenómenos, de lo contrario la erosión hídrica no ocurre o es insignificante.

En cuanto a la sedimentación de las partículas transportadas, estas pueden depositarse en otros sectores del lote o en lotes vecinos (acumulación de capas de considerable espesor que afectan las labores y las propiedades de intercambio líquido y gaseoso del suelo subyacente), o tener consecuencias sobre cursos de agua (ríos, lagunas) y obras hidráulicas (canales, embalses, etc.), reduciendo su capacidad de transporte y almacenaje, provocando inundaciones y contaminando (eutrofización). Esto último se conoce como erosión difusa, de ahí que el control del proceso erosivo debería realizarse a nivel de Cuenca y los productores en cuyos lotes se origina el escurrimiento trabajar conjuntamente con los otros afectados.

**La lluvia** tiene efecto a través del impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, y por el propio humedecimiento del suelo, que provocan desagregación de las partículas primarias; provoca también transporte de partículas por aspersión y proporciona energía al agua de la escorrentía superficial; Ellison (1947).

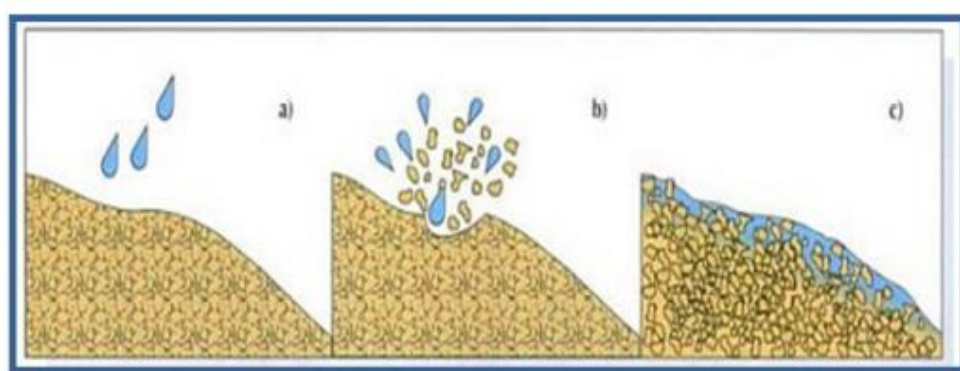


Figura 1.6 Diagrama de erosión pluvial

- a) La erosión pluvial, b) Erosión por impacto de las gotas de lluvia (salpique),  
c) La erosión laminar, que arrastra las partículas del suelo desprendido

Fuente: Nuñez (2001)

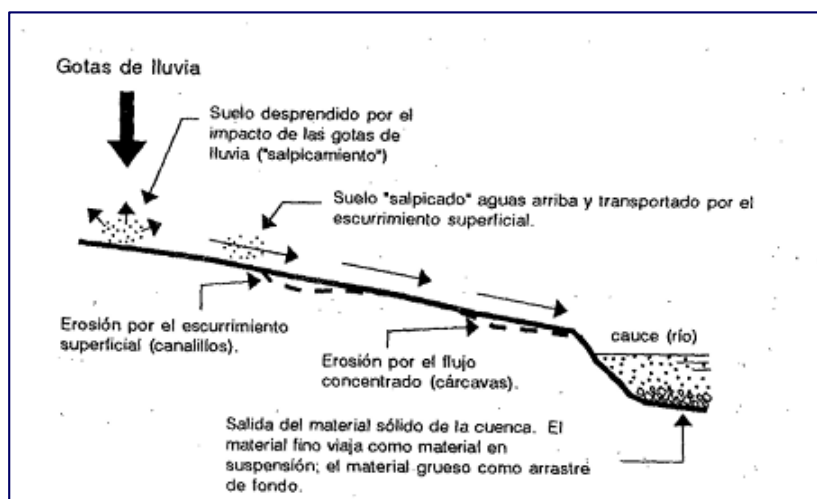


Figura 1.7 Idealización del proceso de erosión en una cuenca

Gracia (s.f.). MIR

**La erosión geológica** es un proceso natural y normalmente presenta tasas bajas, el problema surge cuando debido a la intervención del hombre comienza a producirse una erosión acelerada que impide que el suelo se regenere. Esto puede suponer un peligro para el aprovechamiento de un territorio influyendo además de forma determinante en el riesgo de desertificación (Según el artículo 1 de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación: “degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas”, que se traduce en una pérdida de biomasa y productividad del suelo).

Para Ellison, 1947, los diferentes suelos reaccionan distinto en cada una de las fases del proceso. Los suelos arenosos son más propensos a la desagregación, mientras que los arcillosos son más fácilmente transportables por el menor tamaño de la partícula de arcilla.

### 1.3.2.1 Tipos de erosión

De acuerdo con Miranda (1992), citado de León Vivanco (2008), existen cuatro formas de erosión hídrica, siendo estas las siguientes.

#### a. Erosión por salpicado

Este tipo de erosión se produce por la fuerza con la cual impactan las gotas de lluvia sobre la superficie de un suelo descubierto de vegetación. Produciendo el salpicado de

en grandes cantidades del suelo debido a la energía con la cual impactan dichas gotas de lluvia, provocando por ello el desplazamiento de las partículas removidas del suelo conjuntamente con el flujo superficial y transportándolas por la pendiente del terreno hacia nuevos lugares.

### **b. Erosión laminar**

Para Suárez (2001), la erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa.

Este tipo de erosión es muy peligroso ya que sus primeras manifestaciones son imperceptibles y solo se pueden notar después de transcurrido el tiempo, es decir cuando son más intensa (figura 1.8).

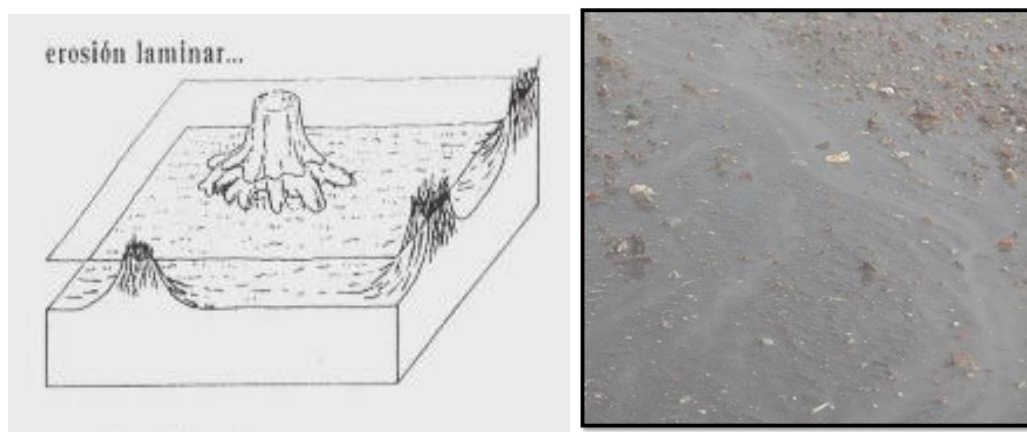


Figura 1.8 Erosión laminar

Fuente: Huariccallo (2013)

### **c. Erosión en surcos**

Este proceso erosivo se da cuando la escorrentía se concentra en determinados lugares adquiriendo volumen y velocidad para formar en el suelo pequeños surcos o canalículos, se muestra en la figura 1.9. De acuerdo con Núñez (2001), “el agua que escurre por la superficie de los terrenos es el mecanismo de transporte de las partículas del suelo, que fluyen mezclados heterogéneamente, y concentran su flujo a lo largo de pequeñas depresiones del terreno. Por esta razón, la característica de los surcos es su paralelismo en el sentido de la pendiente”.

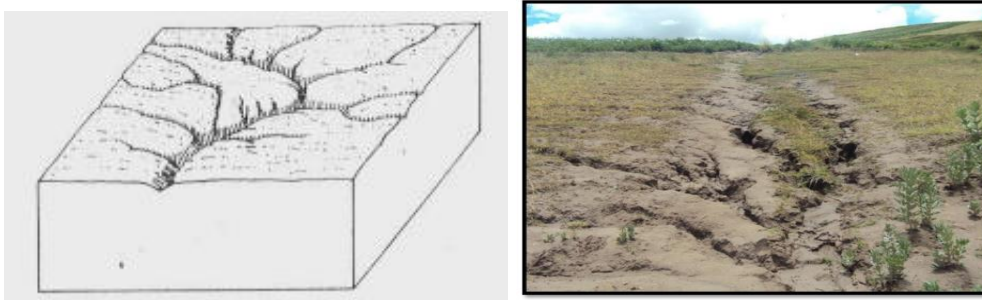


Figura 1.9 Erosión por surcos

Fuente: Huariccallo, (2013)

#### **d. Erosión en cárcavas**

Consiste en pérdidas de grandes masas de suelo formando surcos de gran profundidad y largura trayendo como consecuencia:

- 1- Pérdida de suelo.
- 2- Cambio en el régimen térmico.
- 3- Pérdida en la calidad del relieve.
- 4- Pérdidas en la capacidad de reserva de agua.
- 5- El proceso se ve favorecido en sitios frágiles por presión de pastoreo y malas prácticas de manejo.

Se debe tener en consideración que este proceso erosivo es más complejo que la erosión en surcos; ya que los canales son de mayores dimensiones y con altas tasa de erosión en materiales finos, es por ello que la erosión en cárcavas es considerada el paso siguiente de la erosión en surcos. Según Suarez de Castro (1979), “la erosión en cárcavas se presenta generalmente cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno y se permite que años tras año vayan ampliándose los surcos formados por la acción de esas corrientes de gran volumen y velocidad”.

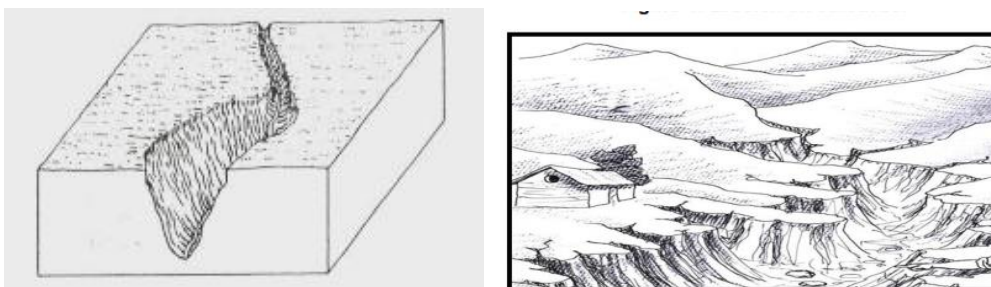


Figura 1.10 Erosión por cárcavas o zanjas

Fuente: Proyecto Jalda - Sucre - Bolivia

### 1.3.3 Degradación del suelo

Se define como el conjunto de procesos que provocan, en forma real o potencial, una disminución de la capacidad productiva, a causa del deterioro de su medio físico, químico y biológico. Según FAO-UNESCO (1995) la degradación del suelo, puede estar fuertemente mediatizada por muchos factores puramente ecológicos y otros de marcada índole antrópica. Agrega además, que en el mundo solo el 11 % de las tierras son aptas para cultivo sin limitaciones; por tanto sin necesidad de mejora de cualquier tipo. Las principales causas de la degradación son la mala utilización de la tierra arable por prácticas inadecuadas de cultivo (35 %), el sobrepastoreo (34%) y la deforestación (20%).

El laboreo convencional y el barbecho desnudo pueden ser ejemplos de prácticas inadecuadas; Giráldez et al (1986). Los cambios introducidos en la agricultura en las últimas décadas, tales como el aumento de la mecanización, la simplificación de las rotaciones y el predominio de la fertilización mineral frente a la orgánica condicionan la degradación del suelo; Benito (1988).

También según Do Prado (1994) degradación del suelo significa el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva.

#### 1.3.3.1 Factores que intervienen en la erosión hídrica

Los factores son parámetros naturales o artificiales que determinan la magnitud de la perturbación, tal como clima, topografía, suelo, vegetación y manejo (acción antrópica); FAO (1997). Así tenemos:

**Clima:** Precipitación, evaporación, temperatura, viento y humedad relativa constituyen los elementos climáticos más importantes; Bennett (1965). De estos elementos, el que tiene más importancia es la precipitación. Su acción se deja sentir por: la cantidad de agua caída, la época del año en que esta cae, su intensidad y la duración; FAO (1997). Por lo tanto la erosividad de una tormenta es función de su

intensidad y duración, y de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de lluvia; Morgan (1997).

**Suelo:** El suelo se representa por su grado de erodabilidad, es decir la susceptibilidad del suelo a ser erosionado; FAO (1997). La resistencia de un suelo depende, en parte, de su posición topográfica, pendiente y grado de alteración. La erodabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos; Morgan (1997).

**Topografía:** Las características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión son; el grado de inclinación, longitud y forma de la pendiente, y tamaño y forma de la cuenca; FAO (1997). La erosión aumenta con frecuencia cuando la longitud de la pendiente es mayor; Bennett (1965). En determinadas condiciones la variación del largo de la pendiente puede causar mayor efecto sobre las pérdidas de suelo que los cambios en su grado de inclinación; Mancilla (1995). En cuanto a la forma de la pendiente, esta también juega un rol importante, ya que terrenos con gradientes cóncavos o convexas no tienen similar comportamiento, aunque la pendiente promedio sea la misma; Mancilla (1995).

**Vegetación:** El manto vegetal influye sobre la proporción del escurrimiento del agua de lluvia y del arrastre del suelo más que cualquier otro factor físico por separado; Bennett (1965). La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia y del agua en movimiento. Cuando el suelo se encuentra cubierto con plantas o residuos, la masa vegetal absorbe la energía de las gotas que caen. El agua caída se escurre lentamente hasta la superficie del suelo donde infiltra con rapidez, pues la cobertura impide el taponamiento de los poros; Derpsch (2004).

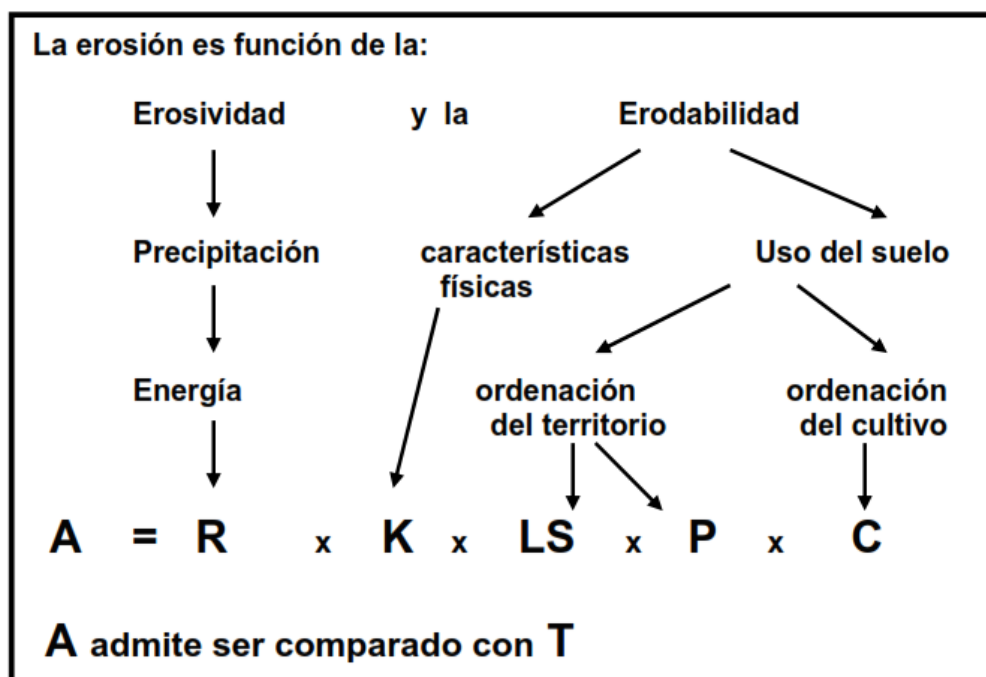


Figura 1.11 Factores que intervienen en la erosión hídrica

Fuente: Derpsch, (2004)

### 1.3.3.2 Factores que causan degradación de suelo inducida por el hombre

#### - Acción antrópica

Las actividades antropogénicas se manifiestan a través del mal uso de los recursos naturales. Entre las actividades humanas relacionadas con la erosión se incluyen la agricultura, pastoreo, minería, silvicultura, recreación, urbanismo y vialidad, entre otras; FAO (1997).

Según Mielniczuk (1984); citado por Morales (2001), se han identificado cinco causas diferentes de intervención física que generan degradación de suelos, siendo éstos:

- Deforestación y remoción de la vegetación natural.
- Sobre pastoreo.
- Inapropiado manejo de las actividades agrícolas.
- Sobreexplotación de la cobertura vegetal para uso doméstico.
- Actividades bio-industriales que conducen a la contaminación química.

### 1.3.3.3 Procesos de degradación del suelo

Los procesos de degradación son los fenómenos causantes de los cambios que conllevan a la disminución de la calidad y productividad de los suelos; generalmente se

inician con descensos en los niveles de materia orgánica y actividades biológica, con efectos desfavorables en la estructura del suelo, especialmente sobre los atributos funcionales de los poros para transmitir y retener agua y para facilitar el desarrollo de las raíces; Pla (1994).

Otro proceso de degradación según Somarriba (1993), define la erosión como el proceso de degradación, transporte y disposición de materiales de los suelos por agentes erosivos. Esto implica la existencia de dos elementos que participan en el proceso: uno pasivo y de resistencia que es el suelo, y uno activo que es el agua, el viento, o su participación alterna; la vegetación por su parte actúa como un regulador de las relaciones entre ambos elementos.

Se pueden sintetizar los procesos de degradación del suelo en lo siguiente:

#### **1.3.3.4 Tasa de recuperación del suelo, T.R.S**

Tasa de formación de suelo (TFS)

Las pérdidas de suelo (PS) se comparan con la tasa de formación del suelo (TFS):

$PS > TFS$  Degradación

$PS = TFS$  Equilibrio

$PS < TFS$  Formación

(0.1 a 2 mm/año) (1 a 20 t/ha/año)

- Disminución y pérdida de fertilidad,
- Aumento de salinización,
- Contaminación por sustancias tóxicas de los recursos hídricos, el suelo, y/o aire,
- Erosión del suelo, tanto hídrica o eólica,
- Deforestación, fragmentación y degradación de vegetación forestal,
- Aridificación y desertificación de los suelos,
- Deterioro de los recursos hídricos

#### **1.3.3.5 Consecuencia de la degradación del suelo**

Se pueden considerar:

- La disminución de la resistencia y resiliencia de los ecosistemas.
- La disminución de la capacidad de adaptación a cambios globales.
- El debilitamiento de la capacidad de respuesta y adaptación de la población afectada.

- El detrimento de los servicios ecosistémicos de la tierra.
- Los suelos se vuelven improductivos y se altera la calidad del agua.
- Los cuerpos de agua sedimentados requieren ser dragados y esto hace más difícil y costoso el procesar el agua que tomamos (potable).
- El agua de lluvia al deslizarse sobre la superficie del terreno o suelo, arrastra partículas de suelo pero también lleva consigo cualquier residuo de sustancias químicas o desechos hacia los ríos y otros cuerpos de agua. Esta agua que se desliza sobre el terreno es la llamada “escorrentía”.

#### **1.3.3.6 Daños que causa la erosión hídrica**

Aunque la erosión hídrica es un proceso natural ocasionado fundamentalmente por las lluvias intensas, la topografía, el bajo contenido de materia orgánica del suelo y el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, algunas actividades humanas, como las técnicas de cultivo inapropiadas, las modificaciones de las condiciones hidrológicas, la deforestación y marginalización o abandono de tierras, contribuyen a intensificarla y acelerarla.

El manejo inadecuado de la tierra es la principal causa de la compactación del suelo. Ejemplos de ello son la densidad excesiva de ganado en una parcela o la utilización inadecuada de maquinaria pesada en el cultivo y el laboreo de una parcela cuando la tierra está demasiado húmeda. Los suelos húmedos no ofrecen suficiente resistencia al peso, lo que provoca la compactación; cita (2). Se pueden considerar el siguiente cuadro.

Cuadro 1.5 Daños directos e indirectos causados por la erosión hídrica

| <b>Daños directos causados en la erosión hídrica</b> | <b>Daños indirectos causados en la Erosión hídrica</b> |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| . Pérdida de materia orgánica                        | Contaminación del agua                                 |
| . Degradación de la estructura del suelo             | . Eutrofización                                        |
| . Compactación de la superficie del suelo            | . Inundaciones                                         |
| . Menor infiltración de agua                         | . Infraestructura sepultada                            |
| . Menor aporte de agua a las capas freáticas         | . Obstrucción en los colectores de drenaje             |
| . Pérdida de suelo de superficie                     | - Modificación de los cursos de los ríos               |
| . Pérdida de nutrientes                              | - Embancamiento de canales, ríos, y puertos.           |
| . Aumento de la fracción gruesa del suelo            |                                                        |
| . Formación de regueros y cárcavas                   |                                                        |
| . Desarraigo de plantas                              |                                                        |
| . Disminución de la productividad del suelo          |                                                        |

Fuente: Cita web (2)

### 1.3.3.7 Formas de medición de la erosión hídrica

Existen diferentes formas de medición y estimación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. Algunas son útiles y aplicables a parcelas o lotes y otras en superficies mayores, locales o regionales (sub cuencas, micro cuencas).

1. Mediciones en parcelas de erosión a campo con lluvia natural (mediano a gran tamaño).
2. Mediciones en parcelas a campo pequeñas con lluvia artificial o simuladores de lluvia (por presión o goteo).
3. Método de laboratorio, con mediciones en bandejas con suelo disturbado o no y lluvia simulada en laboratorio.
4. Mediciones en cuencas con aforos y registros automáticos (par de cuencas).
5. Estimaciones a través de modelos o ecuaciones empíricas. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE).
6. Estimaciones de modelos de simulación. Gran cantidad de modelos en todo el mundo. Algunos aplicables a parcelas o cuencas. Modelos empíricos o físicos: Musle, Epic, Wepp, etc.

### **1.3.4 La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)**

Se trata de una ecuación paramétrica desarrollada por Wischmeier y Smith (que por cierto no eran edafólogos sino matemáticos) en 1978. Se calculó a partir de más de 10.000 datos procedentes de parcelas de erosión de USA (fundamentalmente del este). El método de trabajo de estos métodos paramétricos es relativamente sencillo se enfrenta los datos de la erosión real de los suelos frente a un gran número de características de los suelos y de su medio ambiente. Se hace un análisis factorial y se desechan aquellos que no muestren correspondencias con la erosión. Con los demás se definen ecuaciones de regresión individuales y los que resultan con unos coeficientes de correlación más altos se combinan en una ecuación de regresión múltiple. La USLE es una ecuación sencilla y elegante en la que todos los factores tienen el mismo peso (no hay logaritmos, ni raíces cuadradas, ni potencias,...). Como modelos empíricos se ha descrito el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation), que expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo. La USLE está diseñada para trabajar en fincas cultivadas y con datos climáticos de al menos 20 años.

Se trata de una tecnología empírica generada mediante un proceso evolutivo que ha tenido lugar en los últimos 60 años, y está aún en fase de evolución con el desarrollo de diversas revisiones; Laflen (2003).

Fue desarrollada durante la primera mitad del siglo 20 por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Esta ecuación es el resultado del trabajo de numerosos investigadores como Zingg (1940), que relacionó la erosión con la pendiente y la longitud de la ladera, Musgrave (1947), que incluyó un factor climático basado en la precipitación máxima o Smith (1958) que consideró un nuevo factor según el tipo de cultivo.

Años más tarde, los investigadores Walter Wischmaier y Dwight Smith recogieron estos estudios en su modelo presentado en 1978. Mancilla (2008). Este modelo está basado en una serie de relaciones estadísticas entre las pérdidas de suelo y determinadas variables reconocidas como los factores implicados de mayor significación en el proceso de erosión hídrica. Esta ecuación permite predecir la cantidad de suelo que se pierde por erosión hídrica laminar bajo diferentes combinaciones de uso y manejo teniendo en cuenta las características físicas del

terreno. La USLE tiene en cuenta seis factores y su modelo matemático se muestra en la figura 1.12.

$$A = R * K * L.S. * C * P$$

Dónde:

A: pérdida anual de suelo (t/ha\*año).

R = Erosividad de la lluvia (hJ\*cm/m2\*h\*año).

K = Erodabilidad del suelo (ton\*h\*m2/ha\* hJ\*cm).

LS = longitud de la pendiente en metros y gradiente (adimensional).

C = Factor cobertura (adimensional).

P = Prácticas de conservación del suelo (adimensional).

Estos factores se dividen en básicos o no controlables (R y K) y modificadores o controlables (LS, C y P). En la figura 1.12, Hudson (1982) puede verse un esquema que representa los factores que intervienen en la erosión hídrica.

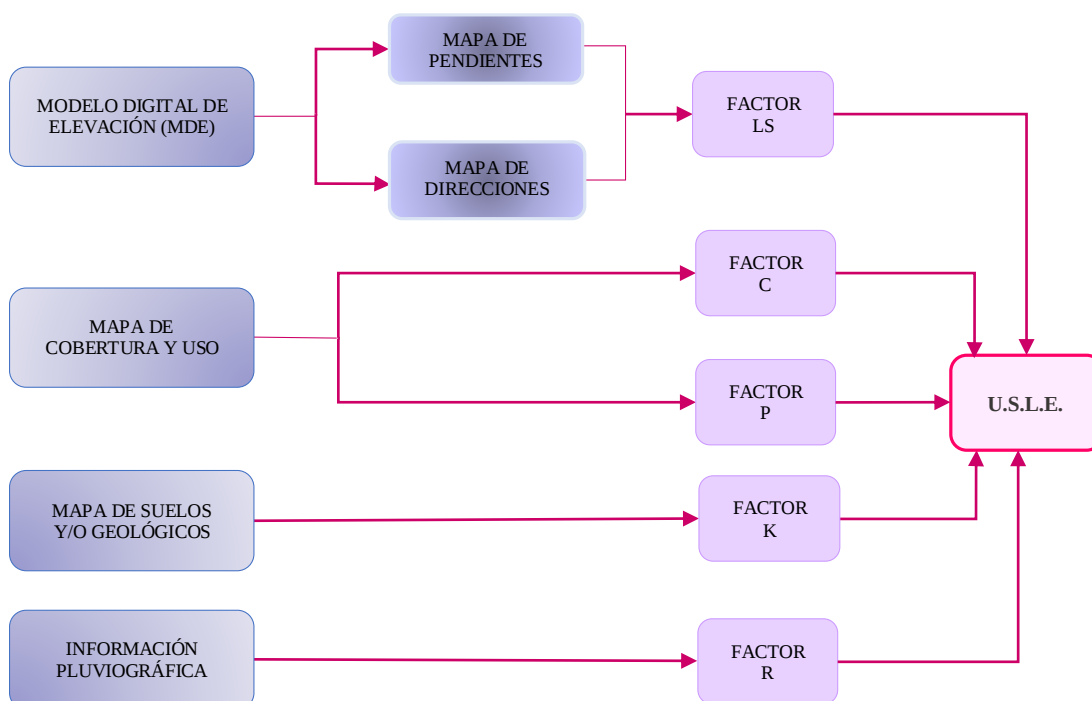


Figura 1.12 Modelo conceptual para la estimación de los niveles de pérdida de suelo según el método USLE

Fuente: Portugués (2015)

## **RUSLE**

Gracia (s.f)

La USLE ha sido frecuentemente modificada por los usuarios para adaptarla a su región y a sus necesidades. Fundamentalmente se han definido dos modificaciones: la RUSLE y la MUSLE. La RUSLE representa la actualización de la USLE para correr en ordenadores personales. RUSLE1 en sistema DOS; RUSLE2 en Windows. Como principales modificaciones, R, se ha ampliado con datos del oeste USA; K, carácter estacional, según humedad; LS, se le da mayor importancia al L; C, con mucha mayor precisión, muchos sub factores y además se tiene en cuenta el factor de recubrimiento por gravas.

MUSLE, actualización USLE para cuencas donde una sola tormenta sustituye valores impacto por escorrentía; cita web (14).

- Adaptación de la USLE a cuencas hidrográficas; cita web (14).

## **MUSLE**

MUSLE (USLE Modificada), que permite obtener el volumen de sedimentos en un determinado evento.

Actualización USLE para: - cuencas - una sola tormenta Sustituye valores impacto por escorrentía. Cita web (14).

### **1.3.4.1 Pérdida Anual de suelo "A" y aporte de sedimento "AS"**

Corresponde a la cuantificación del material sólido que se pone en movimiento en un cierto período (tormenta, mes, año, etc.) como producto de la erosión hídrica

Mientras que el Aporte de sedimento "AS", que también es la pérdida anual de suelo corresponde al material sólido real que aporta una cuenca en su salida (en un cierto período). La diferencia entre estos dos conceptos estriba en que el segundo se toma en cuenta el re-depósito del material dentro de la cuenca y en el primero no, por lo tanto  $A > AS$ . En ambos casos (A y AS), las unidades son las mismas y pueden ser expresados en  $m^3/km^2$ -año,  $ton/km^2$ -año, o en otras equivalentes.

### 1.3.4.2 Estimación del factor R

Para estimar el factor R se puede emplear varias metodologías, como:

- Metodología propuesta por Cortés (1994)

$$R = 2.4619 * P + 0.00606 * P^2$$

Dónde:

R = Erosividad de las lluvias en MJ\*mm/ha\*hr.

P = Precipitación media anual en mm.

- Metodología propuesta por Bertoni y Lombardi Neto (1993)

La metodología es utilizada para generar el índice de erosividad de la lluvia, usando datos de series históricas de precipitación, (Vásquez, 2016) así tenemos:

$$R = 67.355 * \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.85}$$

Dónde:

R = Índice de erosividad en MJ/ha\*mm/hr.

r = Precipitación media mensual en mm.

P = Precipitación promedio anual en mm.

- Método de Fournier

Es un método recomendado por FAO (1979), que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía; el cual utiliza el índice de Fournier que surge del promedio de la sumatoria de los cocientes entre las precipitaciones mensuales (r) elevadas al cuadrado y la precipitación total anual (P):

$$R = 125.59 * \sum \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.603}$$

Dónde:

r = Precipitación media mensual en mm.

P = Precipitación promedio anual en mm.

### 1.3.4.2.1 Clasificación de rangos típicos de R anual

Se tiene trabajos realizados que consideran una clasificación de rangos típicos del valor R, para la pérdida de suelos, así podríamos considerar el siguiente cuadro 1.6.

Cuadro 1.6 Clasificación de rangos típicos de R anual

| Clase    | R (MJ/ha*mm/hr) |
|----------|-----------------|
| Muy baja | <500            |
| Baja     | 500-1000        |
| Mediana  | 1000-3000       |
| Alta     | 3000-6000       |
| Muy alta | >6000           |

Fuente: Mannaerts (1999)

### 1.3.4.3 Estimación del factor K

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

- **Textura.** Se determina a través del método de la pipeta, de tal manera de conocer los montos de arena, limo, arcilla y arenas muy finas (entre 0,05 y 0,1 mm de diámetro). De acuerdo a los manuales originales de USLE, para efectos de la erosión del suelo la arena muy fina se comporta similar al limo.

- **Materia orgánica.** Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de Walkley-Black a las muestras obtenidas.

Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4%.

- **Estructura del suelo.** Se efectúa su determinación mediante observación visual y tacto. Para ello es recomendable en un principio, emplear algún manual para comparación. De acuerdo a USLE, las categorías y códigos empleados son sólo cuatro (cuadro 1.7).

Cuadro 1.7 Códigos de estructuras del suelo USLE

| Código USLE | Categoría de Permeabilidad |                                                                                      |
|-------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Granular muy fina          |   |
| 2           | Granular fina              |   |
| 3           | Granular media a gruesa    |   |
| 4           | Bloques                    |   |
|             | Laminar                    |   |
|             | Masiva                     |  |

Fuente: Mancilla (2008)

- **Permeabilidad del suelo.** En USLE, se asignan seis valores o códigos diferentes de acuerdo a la permeabilidad de un suelo determinado (cuadro 1.8).

Cuadro 1.8 Códigos USLE de permeabilidad del suelo

| Código USLE | Categoría de Permeabilidad                           |
|-------------|------------------------------------------------------|
| 1           | Rápida (más de 12.7 cm-h <sup>-1</sup> )             |
| 2           | Moderada a rápida (6.3 a 12.7 cm-h <sup>-1</sup> )   |
| 3           | Moderada (entre 2 y 6.3 cm-h <sup>-1</sup> )         |
| 4           | Lenta a moderada (entre 0.5 y 2 cm-h <sup>-1</sup> ) |
| 5           | Lenta (entre 0.13 y 0.5 cm-h <sup>-1</sup> )         |
| 6           | Muy lenta (menor a 0.13 cm-h <sup>-1</sup> )         |

Fuente: Mancilla (2008)

El factor K en el Sistema Internacional de unidades es expresado en ton-ha-h-ha-1-MJ-1 –cm-1, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

Se puede determinar a través de:

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

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

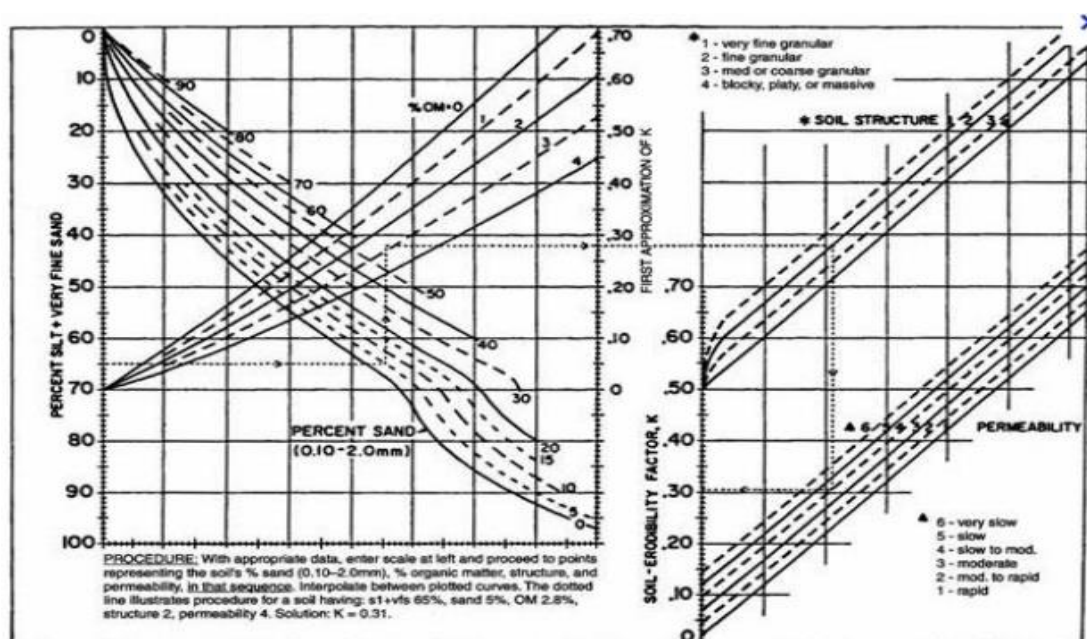
Dónde:

MO: corresponde al porcentaje de materia orgánica del suelo; s es el código de la estructura del suelo;

P: es el código de la permeabilidad;

M: es un factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo. En términos matemáticos, M corresponde a (% limo + arena muy fina)\*(100 - % arcilla).

- Método gráfico para la determinación del factor K



**Clases de estructura (para los 15 – 18 cm superficiales)**

1. Granular muy fina ( $\emptyset < 1\text{mm}$ )
2. Granular fina ( $1\text{mm} < \emptyset < 2\text{mm}$ )
3. Granular de media a gruesa ( $2\text{mm} < \emptyset < 10\text{mm}$ )
4. Cúbica, laminar o masiva

**Clases de permeabilidad (I)**

1. Rápida (de 125 a 250 mm/hr)
2. De rápida a moderada ( $62\text{mm/h} < I < 125\text{ mm/hr}$ )
3. Moderada ( $20\text{mm/h} < I < 62\text{ mm/hr}$ )
4. De moderada a lenta ( $5\text{mm/h} < I < 20\text{ mm/hr}$ )
5. Lenta ( $1.2\text{mm/h} < I < 5\text{ mm/hr}$ )
6. Muy lenta ( $1.2\text{mm/h} < I$ )

Gráfico 1.2 Nomograma del valor de K de Wischmeier y Smith, 1978

Fuente: Mancilla (2008)

- Método utilizando tablas o cuadros

Se propone FAO (2006) el factor K, de acuerdo a la textura o tipo de suelo de la clasificación desarrollada por la World Reference Base for soil Resources (WRB), se muestra en el cuadro 1.9.

Cuadro 1.9. Factor K de acuerdo a la textura del suelo (W.R.B)

| Orden | Textura |       |       | Clasificación WRB |         |
|-------|---------|-------|-------|-------------------|---------|
|       | G       | M     | F     | Nombre            | Símbolo |
| AC    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Acrisol           | AC      |
| AL    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Albeluvisol       | AB      |
| AN    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Alisol            | AL      |
| AR    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Andosol           | AN      |
| CH    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Anthrosol         | AT      |
| CL    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Arenosol          | AR      |
| CM    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Calcisol          | CL      |
| DU    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Cambisol          | CM      |
| FL    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Chernozem         | CH      |
| FR    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Cryosol           | CR      |
| GL    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Durisol           | DU      |
| GY    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Ferralsol         | FR      |
| HS    | 0.053   | 0.02  | 0.007 | Fluvisol          | FL      |
| KS    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Gleysol           | GL      |
| LP    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Gypsisol          | GY      |
| LV    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Histosol          | HS      |
| LX    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Kastanozem        | KS      |
| NT    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Leptosol          | LP      |
| PH    | 0.013   | 0.02  | 0.007 | Lixisol           | LX      |
| PL    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Luvisol           | LV      |
| PT    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Nitisol           | NT      |
| RG    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Phaeozem          | PH      |
| SC    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Planosol          | PL      |
| SN    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Plinthosol        | PT      |
| UM    | 0.026   | 0.04  | 0.013 | Podzol            | PZ      |
| VR    | 0.053   | 0.079 | 0.026 | Regosol           | RG      |
|       |         |       |       | Solonchak         | SC      |
|       |         |       |       | Solonetz          | SN      |
|       |         |       |       | Umbrisol          | UM      |
|       |         |       |       | Vertisol          | VR      |

Fuente. FAO (2006)

Con datos de la textura de los suelos y contenido de materia orgánica, se estima el valor de erodabilidad “K” (cuadro 1.10).

Cuadro 1.10 Erodabilidad de los suelos (K) en función de la textura y el contenido de materia orgánica

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

Fuente: Martínez (2005)

#### 1.3.4.3.1 Clasificación FAO/UNESCO

A continuación se desarrollan la tipología de suelos según la clasificación de la FAO/UNESCO.

##### 1.3.4.3.1.1 Región litosólica

Suelos cuya génesis ha estado muy condicionada a las características topográficas.

Los litosoles son un tipo de suelo que aparece en escarpas y afloramientos rocosos. Su espesor es menor a 10 cm y sostiene una vegetación baja. Se conocen también como leptosoles, del griego leptos, que significa “delgado”.

Constituida por las vertientes occidentales de la cordillera de los Andes entre los 1000 y 5000 msnm, con un relieve de gran pendiente y muy agreste. Predominan los “litosoles”, que son suelos superficiales sobre rocas y también la roca expuesta. En las partes bajas se encuentran suelos arenosos ó “regosoles” y áridos con calcio en el subsuelo, llamados “yermosoles cálcicos”. En la parte Este e intermedia, se ubican los

suelos “yermosoles lúvicos” que contienen arcilla y cal; los “xerosoles”, que poseen una capa oscura y cal, y los “kastanozems” ó suelos pardos. Un suelo muy poco evolucionado, desprovisto de horizontes de diagnóstico y donde tan sólo puede apreciarse la roca original. Son poco aptos para la agricultura.

#### **1.3.4.3.1.2 Vitric andosol**

FAO (2006).

Andosol es una categoría del sistema de clasificación de suelos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que agrupa suelos de origen volcánico de color oscuro y muy poroso. El término andosol es una palabra compuesta de los vocablos japoneses an doque significa "suelo oscuro" y de la raíz latina sol que significa "suelo". Los andosoles son equivalentes a la orden de los andisoles que se emplea en la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Se desarrollan a partir de cenizas y otros materiales volcánicos ricos en elementos vítreos. Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, alrededor de un 20%, además tienen una gran capacidad de retención de agua y mucha capacidad de intercambio catiónico. Se encuentran en regiones húmedas, desde las regiones circumpolares hasta las tropicales, y pueden encontrarse junto una gran variedad de vegetales. Su rasgo más sobresaliente es la formación masiva de complejos amorfos humus-aluminio.

#### **1.3.4.4 Estimación del factor LS (topográfico)**

En condiciones normales, la erosión se incrementa conforme lo hicieran el grado y la longitud de la pendiente, como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la escorrentía superficial; Morgan (1986).

La USLE combina el efecto de la pendiente “S” con la longitud del flujo “L” en un factor topográfico.

$$L.S = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^M * |0.065 + 0.0454 * S + 0.00065 * S^2|$$

Donde:

L.S = factor de grado y longitud de la pendiente.

$\lambda$  = Longitud de la pendiente, en metros.

S = Pendiente media del terreno.

M = 0.5 para pendientes iguales o mayores de 5 %.

0.4 para pendientes entre 3.5 y 4.5 %.

0.3 para pendientes entre 1.0 y 3.0 %.

0.2 para pendientes uniformes menores de 1 %.

#### 1.3.4.4.1 Estimación de la pendiente (S)

• La pendiente se estima como:

$$S = \frac{H_a - H_b}{L}$$

S = Pendiente media del terreno (%).

$H_a$  = Altura de la parte alta del terreno (m).

$H_b$  = Altura de la parte baja del terreno (m).

L = Longitud del terreno (m).

#### - Grado de la pendiente

Podemos indicar como lo indican varios autores, que regula la velocidad de circulación del agua sobre la superficie de forma casi exclusiva.

De ahí que algunos autores relacionan el grado de la pendiente y las pérdidas de suelo; Suárez (1980).

$$X_C = 0,065 * S^{1.49}$$

Dónde:

$X_C$  = Representa la pérdida de suelo en unidades de peso.

S = Pendiente del terreno en %.

#### 1.3.4.4.2 Longitud de la pendiente

Influye en la velocidad por las alturas de agua acumuladas en la parte baja de las pendientes; tales alturas son mayores cuanto más extensas son las vertientes en la parte superior.

$$X = 0,0025 * L^{1.53}$$

X = Representa la pérdida de suelo en unidades convencionales.

$L$  = Longitud horizontal del terreno, en pies.

Efecto combinado de ambas características topográficas:

$$X = 0,0026 * S^{1.37} * L^{1.60}$$

Dónde:

$X$  = Representa la pérdida de suelo debido a la escorrentía (libras).

$S$  = Pendiente en %.

$L$  = Longitud horizontal en pies.

Por planteamientos como el tamaño de las partículas que pueden ser transportados por rodamiento varía con la sexta potencia de la velocidad del agua, en el caso de duplicarse la velocidad de escorrentía, aquel aumentaría 64 veces.

Por otra parte, se dice que la cantidad de material de determinado tamaño que puede transportarse, varía de acuerdo con la quinta potencia de la velocidad de flujo, lo que en otras palabras significa que si la velocidad de escorrentía se duplica, la cantidad de material de determinado tamaño que puede ser transportado se aumenta en 32 veces. Maene y Sulaiman (1980), sugieren de tales planteamientos que tanto la inclinación como la longitud de la pendiente son factores que influyen de manera importante en la erosión del suelo.

#### **1.3.4.5 Estimación del factor C**

Referido a la protección de la cobertura vegetal al suelo cuando intercepta las gotas de lluvia amortiguando su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo del suelo. Para determinar este factor existen diversos criterios; sin embargo, se ha considerado que el más adecuado para los fines de la investigación se muestra en la tabla 1.2 y 1.3.

Tabla 1.2 Valores de C para diferentes cultivos

| Cultivo                | Factor C | Cultivo              | Factor C | Cultivo                    | Factor C |
|------------------------|----------|----------------------|----------|----------------------------|----------|
| Suelo desnudo          | 1.000    | Maíz (baja dens.)    | 0.620    | Maíz (mod. dens.)          | 0.530    |
| Maíz (alta dens.)      | 0.415    | Sorgo (baja dens.)   | 0.555    | Sorgo (alta dens.)         | 0.405    |
| Frijol (baja dens.)    | 0.450    | Frijol (alta dens.)  | 0.400    | Maní                       | 0.575    |
| Yuca                   | 0.430    | Ñame                 | 0.525    | Tomate (solanáceas)        | 0.625    |
| Arroz                  | 0.190    | Papa                 | 0.610    | Trigo (baja dens.)         | 0.625    |
| Trigo (alta dens.)     | 0.580    | Soya (baja dens.)    | 0.460    | Soya (alta dens.)          | 0.415    |
| Algodón                | 0.520    | Tabaco               | 0.545    | Piña                       | 0.330    |
| Lech. Repo. Colif.     | 0.545    | Ajo                  | 0.820    | Cebolla, cebollón          | 0.820    |
| Zanahoria              | 0.690    | Remolacha            | 0.670    | Plátanos, bananos          | 0.250    |
| Cacao                  | 0.180    | Café (con sombra)    | 0.090    | Café (sin sombra)          | 0.180    |
| Asociación maíz-frijol | 0.210    | Asociación maíz-yuca | 0.235    | Asoc. Maíz - yuca - frijol | 0.105    |
| Cítricos               | 0.375    | Patilla, melón       | 0.265    | Auyama                     | 0.010    |
| Pasto denso            | 0.005    | Bosque denso         | 0.001    |                            |          |

Fuente: Delgado y Vásquez (1997); revisado Cortolima (2005)

Tabla 1.3 Firmas espectrales de los polígonos de uso de suelo y valores correspondientes del factor C

| Firmas Espectrales (micrones) |        |        | C     |
|-------------------------------|--------|--------|-------|
|                               | Piso   | Techo  |       |
| Bosque                        | 0.270  | 0.600  | 0.004 |
| Arbusto (Vegetación inducida) | 0.040  | 0.270  | 0.200 |
| Suelo desnudo                 | -0.250 | 0.040  | 0.200 |
| Agua                          | -0.710 | -0.250 | 0.000 |

Fuente: INEI - III censo nacional agropecuario (1994)

#### 1.3.4.6 Estimación del factor P

Es el factor de prácticas conservacionistas. Relación entre la erosión bajo condiciones específicas de labranza en el caso de estudio y la labranza por roturado en el sentido de la máxima pendiente ( $P = 1$ ).

Este factor P, puede ser cambiado por prácticas agronómicas, como las barreras vegetativas o con obras de conservación de suelos como terrazas, zanjas o acequias de ladera, la modificación del factor P está íntimamente ligado a la reducción de la longitud de pendiente (L) y la pendiente (S) sólo puede ser modificada mediante obras de conformación del terreno, tales como terrazas.

Wischmeier et al (1978), indicó sobre valores orientativos de P en función de la pendiente y del tipo de labranza de cultivo (cultivo en contorno, cultivo en franjas de contorno y suelos irrigados, terráceos, etc.). Para determinar este factor existen diversos criterios; sin embargo se ha considerado para los cálculos respectivos la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Valores del factor C y P

| <b>Tipo de cobertura</b>                      | <b>Factor C</b> | <b>Factor P</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Área urbana                                   | 0.100           | 1.000           |
| Suelo desnudo                                 | 0.350           | 1.000           |
| Bosque denso                                  | 0.001           | 1.000           |
| Bosque ralo                                   | 0.010           | 1.000           |
| Bosque mezclado con cultivos (Agroforestería) | 0.100           | 0.800           |
| Cultivos                                      | 0.500           | 0.500           |
| Cultivos de inundación                        | 0.100           | 0.500           |
| Pastura densa                                 | 0.080           | 1.000           |
| Pastura rala                                  | 0.200           | 1.000           |
| Pasturas con cultivos                         | 0.250           | 0.800           |
| Humedales                                     | 0.050           | 1.000           |
| Cuerpos de agua                               | 0.010           | 1.000           |

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

#### 1.3.4.6.1 Estimación de la erosión hídrica potencial

Con el término erosión hídrica potencial se hace referencia a la susceptibilidad que tiene una zona o región a erosionarse por influencia del agua y por sus características físicas de clima, suelo y relieve. Está constituida por los siguientes factores:

$$A_p = R * K * L.S$$

##### 1.3.4.6.1.1 Clasificación de la erosión hídrica potencial

En la siguiente tabla se muestra los rangos de pérdida de suelo y el tipo de riesgo de erosión hídrica potencial.

Tabla 1.5 Clasificación de la erosión hídrica potencial

| Grados | Pérdida de suelos<br>t/ha/año | Riesgo de erosión |
|--------|-------------------------------|-------------------|
| 1      | < 10                          | Muy bajo          |
| 2      | 10 - 50                       | Medio             |
| 3      | 50 - 200                      | Alta              |
| 4      | > 200                         | Muy alta          |

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

#### 1.3.4.6.2 Estimación de la erosión hídrica actual

Los términos de la fórmula para determinar Erosión Potencial máxima teórica o erosión actual, se le adicionan los factores C y P.

$$A_g = R * K * L.S * C * P$$

Dónde:

C: El factor cobertura y manejo, es la proporción de pérdida de suelo en una parcela en barbecho, con labranza continua.

P: El factor de prácticas de apoyo de conservación, es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como: cultivos en contorno, barreras vivas, o cultivos en Terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente.

##### 1.3.4.6.2.1 Clasificación de la erosión hídrica actual

En la siguiente tabla se muestra los rangos de perdida de suelo y el tipo de riesgo de erosión hídrica actual.

Tabla 1.6 Clasificación de la erosión hídrica actual

| Grados | Pérdida de suelos<br>t/ha/año | Riesgo de erosión |
|--------|-------------------------------|-------------------|
| 1      | < 0.5                         | Normal            |
| 2      | 0.5 - 5.0                     | Ligera            |
| 3      | 5 - 15                        | Moderada          |
| 4      | 15 - 50                       | Severa            |
| 5      | 50 - 200                      | Muy severa        |
| 6      | > 200                         | Catastrófica      |

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

## **1.4 Sedimentos**

Se da el nombre genérico de sedimentos a las partículas procedentes de las rocas o suelos y que son acarreadas por las aguas que escurren.

Todos estos materiales, después de cierto acarreo finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, en presas de almacenamiento, en la planicie y hasta el mar.

El sedimento es un elemento importante en la degradación de nuestro medio-ambiente.

### **1.4.1 Transporte de sedimentos por corrientes**

Gracia (s.f), define que cuando el sedimento es transportado por el flujo se diferencian dos grandes grupos de transporte de sedimentos:

- Sedimento de lavado: son partículas muy finas como limos y arcillas provenientes tanto de la erosión laminar como de los canales; y que el agua transporta en suspensión, por lo cual su concentración es función del gasto líquido. Este material o carga de lavado puede abandonar la cuenca en cada evento lluvia-escurrimiento; en general, esto no sucede con el material de fondo ya que este solo recorre pequeñas distancias en cada avenida. Este material fino en muchos casos está constituido fundamentalmente por material de lavado.
- Sedimento de fondo: se transportan partículas gruesas que provienen de la erosión de los canales, son partículas mayores a 0.062 mm y pueden ir dentro de la capa de fondo (arrastre) o en suspensión (según Einstein la capa de fondo es aquella cuya altura es igual a 2 veces el diámetro de la partícula).

El transporte de fondo depende de las características hidráulicas de la corriente (hidráulica fluvial) en cambio un río puede transportar tanto material de suspensión como llegue a él, independientemente de sus características hidráulicas.

### **Contexto geomorfológico y composición del sólido**

La erosión, el transporte y la sedimentación de las partículas sólidas dependen de varios factores: su dimensión, su densidad, su forma.

La composición mineralógica es otro factor importante, en el comportamiento de los sólidos en contacto con sustancias disueltas y el fenómeno de floculación de los más

finos (aluminosilicatos y coloides). Existe una clasificación estándar para el tamaño de las partículas, se observa en la tabla 1.7.

Tabla 1.7 Contexto geomorfológico y composición del sólido

| Dimensiones de las partículas |                  |             | Número de aberturas en el tamiz, por pulgada |                |                   | Categoría                    |
|-------------------------------|------------------|-------------|----------------------------------------------|----------------|-------------------|------------------------------|
| Milímetros                    | Milímetros       | Micrones    | Tyler                                        | Estándar E.U.A |                   |                              |
| 4000 – 2000                   |                  |             |                                              |                | Material granular | Piedra redondeada muy grande |
| 2000-1000                     |                  |             |                                              |                |                   | Piedra redondeada grande     |
| 1000 – 500                    |                  |             |                                              |                |                   | Piedra redondeada mediana    |
| 500 – 250                     |                  |             |                                              |                |                   | Piedra redondeada pequeña    |
| 250 – 130                     |                  |             |                                              |                |                   | Canto rodado grande          |
| 130 – 64                      |                  |             |                                              |                |                   | Canto rodado pequeño         |
| 64 – 32                       |                  |             |                                              |                |                   | Grava muy gruesa             |
| 32 - 16                       |                  |             |                                              |                |                   | Grava gruesa                 |
| 16 – 8                        |                  |             | 2 1/2                                        |                |                   | Grava mediana                |
| 8 – 4                         |                  |             | 5                                            | 5              |                   | Grava fina                   |
| 4 – 2                         |                  |             | 9                                            | 10             |                   | Grava muy fina               |
| 2 – 1                         | 2.00 – 1.00      | 2000 – 1000 | 16                                           | 18             |                   | Arena muy gruesa             |
| 1 – 1/2                       | 1.00 – 0.50      | 1000 – 500  | 32                                           | 35             |                   | Arena gruesa                 |
| 1/2 – 1/4                     | 0.50 – 0.25      | 500 – 250   | 60                                           | 60             |                   | Arena mediana                |
| 1/4 - 1/8                     | 0.25 – 0.125     | 250 – 125   | 115                                          | 120            |                   | Arena fina                   |
| 1/8 – 1/16                    | 0.125 – 0.062    | 125 – 62    | 250                                          | 230            |                   | Arena muy fina               |
| 1/16 – 1/32                   | 0.062 – 0.031    | 62 – 31     |                                              |                | Material cohesivo | Limo grueso                  |
| 1/34 – 1/64                   | 0.031 – 0.016    | 31 – 16     |                                              |                |                   | Limo mediano                 |
| 1/64 – 1/128                  | 0.016 – 0.008    | 16 – 8      |                                              |                |                   | Limo fino                    |
| 1/128 – 1/256                 | 0.008 – 0.004    | 8 – 4       |                                              |                |                   | Limo muy fino                |
| 1/256 – 1/512                 | 0.004 – 0.0020   | 4 – 2       |                                              |                |                   | Arcilla gruesa               |
| 1/512 – 1/1024                | 0.0020 – 0.0010  | 2 – 1       |                                              |                |                   | Arcilla mediana              |
| 1/1024 – 1/2048               | 0.0010 – 0.0005  | 1 – 0.5     |                                              |                |                   | Arcilla fina                 |
| 1/2048 – 1/4096               | 0.0005 – 0.00024 | 0.5 – 0.24  |                                              |                |                   | Arcilla muy fina             |

Fuente: Cita web (28)

#### 1.4.1.1 Producción de sedimentos o aporte de sedimentos, AS

No todo lo que se calcula como erosión en la ecuación universal es sedimento ya que parte del material irá siendo depositado o atrapado. Esa parte que sigue su ruta hasta un punto tal como una presa es llamada tasa de sedimentos.

Lo que se calcula con la ecuación se multiplica por una proporción de desplazamiento.

El aporte de sedimentos en suspensión de los continentes al océano es en promedio de 201 tn/km<sup>2</sup>/año y se considera que una cantidad similar de materiales disueltos son transportados por los cursos de agua.

Langbein y Schumm (1958), analizaron datos de numerosas cuencas de EE.UU. con vegetación natural, para elaborar la curva de relación entre producción media anual de sedimentos por unidad de superficie y precipitación media anual. Según esta curva la máxima producción de sedimentos se produce con una precipitación de alrededor de 12 pulgadas (305 mm) correspondiente a regiones áridas/semiáridas, donde existen lluvias y escasa protección vegetal.

La producción de sedimentos en la cuenca depende de sus características morfométricas (forma, pendiente, etc.), climáticas (precipitación, temperatura), geológicas – geomorfológicas y suelos, usos de la tierra y vegetación, entre otras.

Producción de sedimentos debido a escurrimientos (MUSLE). No ocupa multiplicarse por proporción de desplazamiento.

#### **1.4.1.1.1 Estimación de aporte de sedimentos**

Existen muchos criterios empíricos para calcular el aporte de sedimento a continuación se presentan los más empleados:

##### **a. MUSLE**

Otro enfoque para estimar el rendimiento de sedimento de cuencas fue adoptado por Williams (1975), desarrolló la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE). Es un modelo de parámetros "agrupados" que estima el rendimiento de sedimento de cuencas para un evento pluvioso único. Utiliza un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluviosa del USLE.

Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente a través de la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo.

$$Y = 1.856 * (Q * I_{m\acute{a}x})^{0.56} * (A)^{0.12} * K * L * S * C * P_m$$

Dónde:

Y = es el rendimiento de sedimento a la salida de la cuenca. Sedimentos aportados a una sección del cauce para una tormenta determinada sobre la cuenca (t/ha).

Es la cantidad de sedimentos que se producen durante una tormenta singular (en toneladas métricas, t).

$A$  = Área de la cuenca (ha).

$I_{máx.}$  = Intensidad máxima (I-D-F).

$Q$  = es la esorrentía total del evento (mm).

Escorrimento máximo por evento de lluvia (mm.h-1).

$K$  = Factor de erosionabilidad del suelo (t ha h MJ-1.mm-1.ha-1).

$L$  = Factor de longitud de la pendiente (adimensional).

$S$  = Factor de grado de la pendiente (adimensional).

$C$  = Factor de cobertura vegetal y manejo de cultivos (adimensional).

$P_m$  = Factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

La MUSLE y la MUST, se pueden utilizar para evaluar eventos o se pueden aplicar a un período en particular, por ejemplo el ciclo de un cultivo.

## **b. El coeficiente de entrega de sedimentos, CES**

$$CES = 100 * \frac{AS}{ET}$$

Despejando AS obtenemos la siguiente fórmula:

$$AS = \frac{CES * ET}{100}$$

Donde:

$AS$  = Aporte de sedimentos de la cuenca en t/km<sup>2</sup>\*año.

$CES$  = Coeficiente de entrega de sedimentos en %.

$ET$  = Erosión total de la cuenca, en t/km<sup>2</sup>\*año.

$$ET = A_a$$

$A_a$  = Erosión hídrica actual en t/km<sup>2</sup>\*año.

Para calcular el coeficiente de entrega de sedimentos, la ASCE propone el gráfico 1.3.

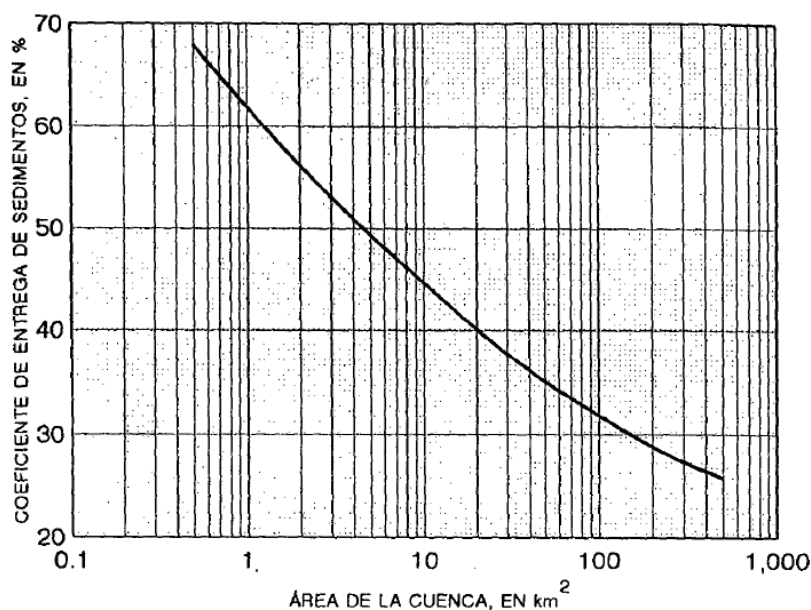


Gráfico 1.3 Gráfica para el cálculo de CES (ASCE)

Fuente: Gracia (s.f.)

**c. El USBR propone un criterio para evaluar el aporte de sedimentos (AS),** que se basa en mediciones realizadas en varias cuencas del suroeste de EUA. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$AS = 1421.8 * (A_C)^{-0.229}$$

Dónde:

AS: Aporte de sedimento, en m³/km²-año.

Ac: Área de la cuenca, en km².

#### 1.4.1.1.2 Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente

El cálculo de la capacidad de una corriente para el transporte de sedimentos de fondo requiere información sobre las características hidráulicas, geomorfológicas y granulométricas del cauce.

Sin embargo, en ríos de fuerte pendiente y para caudales que superen ampliamente el umbral del movimiento de las partículas se dan una serie de circunstancias que permiten calcular el caudal sólido de acarreo a partir de ecuaciones muy simples, que involucran únicamente caudal líquido y pendiente longitudinal del lecho, con el consiguiente ahorro.

Se derivan ecuaciones para determinar el orden de magnitud de la capacidad de transporte sólido ( $Q_s$ ) dado un caudal líquido ( $Q$ ) a partir de ecuaciones del tipo:

$$Q_s = K * S^m * Q$$

Siendo:

$k$  y  $m$  coeficientes.

$S$  = Pendiente del cauce del río (%).

$Q_s$  = Caudal sólido.

$Q$  = Caudal líquido.

$C$  = Concentración de caudal sólido sobre caudal líquido.

La ecuación anterior se puede expresar de:

$$C = K * S^m$$

$$C = \frac{Q_s}{Q} \text{ Es la concentración de sedimentos por unidad de caudal líquido}$$

Fórmulas propuestas:

1. Mizuyama (1981) a partir de datos de un canal de laboratorio de fuerte pendiente (entre el 5 y 25%) en condiciones de tensión de corte muy superior a la tensión crítica de las partículas del lecho propone la ecuación:

$$C = 5,5 * S^2$$

2. Mizuyama y Shimohigashi (1985)

Se utiliza para cauces de fuerte pendiente, propuesta para fluido sin concentración significativa de finos en suspensión:

$$C = \frac{20}{\left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right) - 1 \right]^2} * S^2$$

Tomando  $\left( \frac{\rho_s}{\rho} \right) = 2.65$ , resulta:

Donde:

$\rho_s$  = Densidad de las partículas de sedimento

$\rho$  = Densidad del fluido

$$C = 7.35 * S^2$$

## **1.5 Prácticas mecánicas de conservación del suelo**

### **1.5.1 Manejo de laderas**

El manejo de éstas se realiza con el fin de controlar la erosión, por lo que, se debe minimizar la velocidad del agua o escurrimiento del agua en la superficie del suelo, para esto las prácticas de control deben iniciarse desde las partes más altas de la ladera hacia abajo, nunca en sentido contrario, las principales prácticas de conservación de suelos y aguas son las mecánicas estructurales, agronómicas y forestales; Vásquez (2000).

Las laderas también son el espacio de vida de una flora y fauna específica y contienen áreas forestales y micro-reservorios de biodiversidad. Juegan un papel fundamental en la regulación del sistema hídrico de regiones enteras. Por lo tanto, las intervenciones informadas, negociadas y planificadas que los mismos habitantes realizan sobre su sistema con el apoyo de la investigación, la transferencia y su propia capacidad de innovación, tienen importancia estratégica para la estabilización del sistema “laderas” y con ello para regiones enteras de América Latina; Krause y Meléndez (1999).

#### **1.5.1.1 Obras de protección**

El desarrollo de los modelos de erosión tiene como objetivo facilitar la estimación del material sólido erosionado y diseñar así las posibles medidas de protección para evitar la pérdida de suelo.

Pizarro (2003), indica que la construcción de obras de conservación de laderas, ha estado marcada por procesos relacionados con la eventualidad de fenómenos hidrometeorológicos, bajo los cuales se producen pérdidas, principalmente económicas. Así, y a partir de estos eventos, normalmente se generan demandas sociales de la población o las autoridades locales, con el fin de mitigar las consecuencias de crecidas de ríos con sus correspondientes desbordes, inundaciones y

socavación de riberas, movimientos en masa, como aludes y deslizamientos de tierra, cortes de caminos, procesos erosivos con pérdida de la fertilidad de los suelos, generación de cárcavas, derrumbe de viviendas. Por lo que, las obras mecánicas de protección es una alternativa para mitigar tales consecuencias.

#### **1.5.1.1.1 Sistemas de andenería**

##### **a. Andén (agricultura)**

Andenes en el Valle Sagrado de los Incas, en proximidad de Písac, Perú.

Los andenes es una conformación de suelos planos por medio de la construcción de plataformas soportadas por muros de contención; Treacy (1994). Constituyen los bancales o conjuntos de terrazas escalonadas construidas en las laderas de las montañas andinas y rellenas con tierra de cultivo. La mayoría de los andenes existentes datan de los tiempos precolombinos.



Figura 1.13 Andenes

Fuente: Pizarro et al (2004)

Pizarro et al. (2004), señala que una terraza es una plataforma formada artificialmente, que interrumpe la pendiente del terreno, permitiendo al mismo tiempo que en estas plataformas se cultive o se planten especies forestales. Su finalidad es la defensa del

suelo contra la erosión hídrica, provocada por la lámina de escurrimiento. La clasificación más usual de las terrazas es la que las divide en terrazas de talud y terrazas con muro. En las primeras es el talud natural el que define el escalón en el terreno y sólo debe aplicarse a pendientes relativamente bajas; mientras que en las segundas, el talud natural queda protegido por un muro de contención, normalmente de mampostería en seco. El ancho de la terraza está determinado tanto por la naturaleza del suelo y su profundidad, como por la pendiente del terreno.

En el Perú, el andén y/o terraza es una práctica conservacionista que los antiguos pobladores dominaron ampliamente llegando a construir verdaderos complejos agrícolas de alta tecnología hidráulica, utilizando para los muros, piedras y para el relleno de la plataforma material acarreado y seleccionado (grava, suelo y materia orgánica).

Sin embargo, el desarrollo de las terrazas no fue un invento inca, sino que se sostuvo en una experiencia de muchas otras culturas que la antecedieron, probablemente desde 900 a.C.; Mujica (1996). No obstante, fueron los incas quienes llevaron esta técnica a su máxima expresión y la utilizaron no solamente como una forma de alimentar a su vasto imperio, sino de subrayar el carácter ritual de su relación con el paisaje.

- La ciudadela de Machu Picchu usó las terrazas como elementos de soporte estructural y como sistema de desagüe ante la gran cantidad de precipitaciones pluviales que recibía esta zona de ceja de selva.

- Las terrazas según su configuración y construcción pueden denominarse de diversas maneras como: terrazas de base angosta, terrazas individuales, terrazas de banco, etc.

- Tipón o Moray servían como centros de experimentación para "domesticar" especies vegetales, plantándolas en andenes a diferentes alturas y distintos microclimas.



Figura 1.14 Moray, otro laboratorio agrícola. Foto cortesía de Paranoias

Fuente: Cita web (29)



Figura 1.15 Complejo Moray

Fuente: Cita web (29)

### **Complejo Moray**

Son sistemas de andenes o terrazas en forma concéntrica, a manera de anfiteatros contruidos en cuatro hondonadas diferentes, estas construcciones están realizadas sobre muros de contención en piedra y barro, una sobre otra, el tamaño desde la base va en aumento y ensanchamiento, cuya profundidad es aproximadamente de cien metros, y cada andén tiene 1,80 m. de altura. La más grande tiene doce andenes, se muestra en la figura 1.15.

### **Aplicaciones**

- Contribuir a la producción de alimentos.
- Efectivos métodos de reducir la erosión.
- Mejorar las condiciones microclimáticas del terreno, especialmente en los pisos más altos, donde se incrementa la capacidad de conservación del calor del suelo por acción de la radiación solar, que es absorbida por las piedras de los muros"; Rostworowski (2004), citado por Mujica (1996).
- Se logra utilizar racionalmente las laderas.
- Minimizar el riesgo de heladas.
- Lograr una mayor exposición al sol.
- Controlar la escorrentía del agua.
- Incrementar la infiltración, mantener un buen drenaje y mejor aireación del suelo agrícola.

### **b. Andenes, camellones y sistema de canales de irrigación**

Tanto los andenes como los camellones y los sistemas de irrigación construidas por las civilizaciones Pre Incas e Incas significan un gran paso para la agricultura en la región. Estos tres sistemas significaron los primeros pasos de la tecnología agrícola. La gran trascendencia de estas creaciones andinas se basa en que a raíz de estos inventos los pobladores andinos lograron hacer uso de tierras que de otra manera no hubiese sido posible.

En primer lugar, los andenes por ejemplo consiguieron que las tierras de las laderas escarpadas pudieran ser utilizadas para el cultivo. Asimismo, estos andenes estuvieron en combinación con un complejo sistema de canales de irrigación, los cuales lograban

llevar el agua desde los ríos y riachuelos hasta lo más alto de las montañas, creando andenes altamente productivos. Además, este sistema hidráulico conseguía canalizar el agua proveniente de las lluvias lo cual evitaba la erosión de los andenes. Y en segundo lugar, con los camellones se logró utilizar las tierras cercanas al lago Titicaca, que antes a este sistema eran inútiles debido a que se encontraban inundadas en cierta época del año.

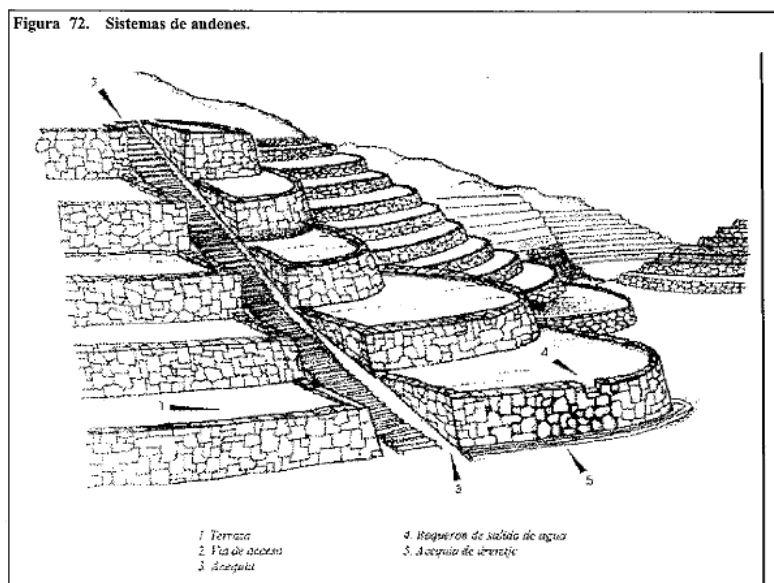


Figura 1.16 Sistema de canales de irrigación en laderas

Fuente: Cita web (29)



Figura 1.17 Ruinas de Huayanay, Cusco

Fuente: Cita web (29)

### c. Terrazas agrícolas inkaikas

Las terrazas agrícolas inkaikas tienen muros de albañilería, a veces con fina piedra canteada, y están rellanadas con capas de piedra, grava y tierra para proporcionar un drenaje apropiado. En la base inferior existe un relleno de piedra que proporciona estabilidad y permite un fácil flujo de agua. Sobre ellas continua una capa de piedras más pequeñas, otra capa de grava y otra de arena. Finalmente éstas se cubrían con tierra de cultivo, que frecuentemente alcanza un espesor de un metro y que probablemente haya sido traída desde el valle al fondo de la quebrada.



Figura 1.18 Partes de un andén

Fuente: Cita web (29)

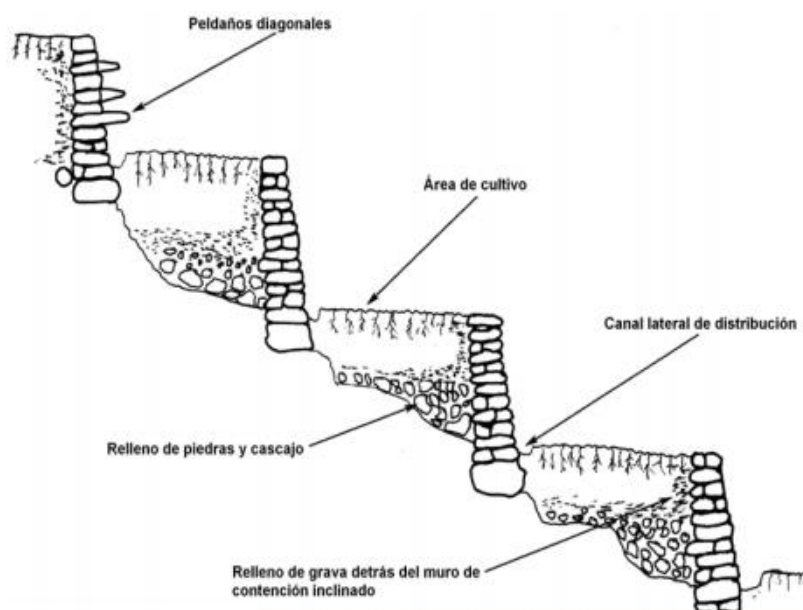


Figura 1.19 Parte de los andenes

Fuente: Cita web (29)

#### **d. Estructura de un andén o terraza**

##### Estructura

Un andén consta fundamentalmente de tres partes:

- **Muro de contención**; hecho a base de bloques de piedra al estilo inca, es decir, perfectamente unidas.
- **Material de relleno**, constituido por cascajo, arena o arcilla, el cual servirá de base para la tierra fértil.
- **Tierra vegetal o tierra fértil**, donde se realizaba el cultivo de su variada flora; Castillo (1993).

##### Ejemplos de andenes

Los andenes más importantes que tenemos son:

- **Los de Moray**, que son los únicos andenes circulares del mundo.
- **Los de Pisac- Urubamba-Cusco**, que se utilizaba para el cultivo de maíz, y que aún siguen siendo utilizados por los pobladores de esa zona.
- **Los de las llanuras del Colca**, realmente espléndidos, dignos de admiración.

Aquí en Bambamarca, se ha sabido combinar la modernidad con la tecnología tradicional de los andenes, construyéndolos pequeños, de cemento y piedra, están ubicados en las laderas de los alrededores de la ciudad, y se usan generalmente como jardines. Los más representativos son los mini andenes del parque Santa Rosa y los del jirón los pinos.

#### **e. Andenes asiáticos**

La técnica de utilizar las laderas de los cerros como terrazas agrícolas no es, por supuesto, exclusividad incaica. En Asia, y sin llegar a la sofisticación de la cultura andina en el manejo de la piedra, se utilizan terrazas en Japón, China, Vietnam y en Indonesia.



Figura 1.20 Terrazas de arroz en Bali, Indonesia

Fuente: Cita web (29)

Pero en ningún paraje asiático se logra un modelado del paisaje tan espectacular como en Banaue, en las Filipinas, promocionado como la octava maravilla del mundo. Espero referirme a él en un futuro post.

## **f. Diseños**

### **f.1 Parámetros principales**

A continuación se detallan los principales parámetros a tomarse en cuenta en el diseño de un andén.

Las pendientes longitudinal y transversal del banco o terraza son los parámetros principales porque definen la velocidad del flujo del agua; para que no sea erosivo, tales pendientes deben estar entre 0,0% y 0,3%.

#### **f.1.1 Espaciamiento entre muros (A)**

Es la distancia horizontal entre los muros longitudinales de dos andenes consecutivos (figura 1.21). Su dimensión está en razón directa a la altura del muro y en razón inversa a la inclinación original de la ladera.

Según la relación:

$$A = \frac{H}{\operatorname{tg} \theta}$$

Cuando  $\theta$  crece, el distanciamiento entre muros es definido por el valor  $H$ , que en promedio tiene un límite comprendido entre 1,5 a 2,0 m. Excepcionalmente llega a 3,0 m. cuando en la ladera original, antes de la construcción de los andenes la capa de tierra sobre la roca fue delgada, obligó a disminuir la altura del muro ( $H$ ) y consecuentemente el espaciamiento ( $A$ ).

El espaciamiento entre dos andenes se puede medir utilizando la diferencia de nivel entre ellas, llamado intervalo vertical ( $IV$ ) y el intervalo horizontal ( $IH$ ), este último generalmente se mide en el terreno. Las ecuaciones para el cálculo son las siguientes:

$$IV = \left( 2 + \frac{S}{3 \text{ ó } 4} \right) \times 0.305$$

Dónde:

$IV$ : Intervalo vertical (m).

$S$ : Pendiente del terreno (%).

3: Factor que se utiliza en áreas donde la precipitación  $< 1200\text{mm/año}$ .

4: Factor que se utiliza en áreas donde la precipitación  $> 1200\text{mm/año}$ .

0.305: Factor de corrección de pies a metros.

$$IH = \frac{IV}{S} \times 100$$

Dónde:

$IH$ : Intervalo Horizontal (m).

$IV$ : Intervalo Vertical (m).

$S$ : Pendiente del terreno (%).

Para la facilidad de cálculo se presenta el siguiente cuadro, donde los datos que se requieren son: pendiente del terreno y la precipitación anual de la zona.

Tabla 1.8 Espaciamientos verticales y horizontales para replantar desviaciones en terrenos de ladera según el porcentaje de pendiente y la precipitación

| Pendiente<br>% | Zonas con precipitaciones<br>menores a 1200 mm/año |                                    | Zonas con precipitaciones<br>mayores a 1200 mm/año |                                    |
|----------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|
|                | Intervalo<br>vertical<br>IV<br>m                   | Intervalo<br>Horizontal<br>IH<br>m | Intervalo<br>Vertical<br>IV<br>m                   | Intervalo<br>Horizontal<br>IH<br>m |
| 2              | 0.8133                                             | 40.67                              | 0.7625                                             | 38.13                              |
| 3              | 0.9150                                             | 30.50                              | 0.8388                                             | 27.96                              |
| 4              | 1.0167                                             | 25.42                              | 0.9150                                             | 22.88                              |
| 5              | 1.1183                                             | 22.37                              | 0.9913                                             | 19.83                              |
| 6              | 1.22                                               | 20.33                              | 1.0675                                             | 17.79                              |
| 7              | 1.3217                                             | 18.88                              | 1.1438                                             | 16.25                              |
| 8              | 1.4233                                             | 17.79                              | 1.22                                               | 15.25                              |
| 9              | 1.525                                              | 16.94                              | 1.2963                                             | 14.4                               |
| 10             | 1.6267                                             | 16.27                              | 1.3725                                             | 13.73                              |
| 11             | 1.7283                                             | 15.71                              | 1.4488                                             | 13.17                              |
| 12             | 1.8300                                             | 15.25                              | 1.525                                              | 12.71                              |
| 13             | 1.9317                                             | 14.86                              | 1.6013                                             | 12.32                              |
| 14             | 2.0333                                             | 14.52                              | 1.6775                                             | 11.98                              |
| 15             | 2.1350                                             | 14.23                              | 1.75138                                            | 11.69                              |
| 16             | 2.2367                                             | 13.98                              | 1.83                                               | 11.44                              |
| 17             | 2.3383                                             | 13.75                              | 1.9063                                             | 11.21                              |
| 18             | 2.4400                                             | 13.56                              | 1.9825                                             | 11.01                              |
| 19             | 2.5417                                             | 13.38                              | 2.0588                                             | 10.84                              |
| 20             | 2.6433                                             | 13.22                              | 2.1350                                             | 10.68                              |
| 21             | 2.7450                                             | 13.07                              | 2.2113                                             | 10.53                              |
| 22             | 2.8567                                             | 12.94                              | 2.2875                                             | 10.4                               |
| 23             | 2.9483                                             | 12.82                              | 2.3638                                             | 10.28                              |
| 24             | 3.0500                                             | 12.71                              | 2.4400                                             | 10.17                              |
| 25             | 3.1517                                             | 12.61                              | 2.5163                                             | 10.07                              |
| 26             | 3.2533                                             | 12.51                              | 2.5925                                             | 9.97                               |
| 27             | 3.3550                                             | 12.43                              | 2.6688                                             | 9.88                               |
| 28             | 3.4567                                             | 12.35                              | 2.7450                                             | 9.8                                |
| 29             | 3.5583                                             | 12.27                              | 2.8213                                             | 9.73                               |
| 30             | 3.6600                                             | 12.20                              | 2.5975                                             | 9.66                               |
| 31             | 3.7617                                             | 12.13                              | 2.5738                                             | 9.59                               |
| 32             | 3.8633                                             | 12.07                              | 3.0600                                             | 9.53                               |
| 33             | 3.9650                                             | 12.02                              | 3.1263                                             | 9.47                               |
| 34             | 4.0667                                             | 11.56                              | 3.2025                                             | 9.42                               |
| 35             | 4.1683                                             | 11.51                              | 3.2788                                             | 9.37                               |
| 36             | 4.2700                                             | 11.56                              | 3.565                                              | 9.32                               |
| 37             | 4.3717                                             | 11.52                              | 3.4313                                             | 9.27                               |
| 38             | 4.4733                                             | 11.77                              | 3.5075                                             | 9.23                               |

|    |        |       |        |      |
|----|--------|-------|--------|------|
| 39 | 4.5750 | 11.73 | 3.5838 | 9.19 |
| 40 | 4.6767 | 11.69 | 3.6600 | 9.15 |
| 41 | 4.7783 | 11.63 | 3.7363 | 9.11 |
| 42 | 4.8800 | 11.52 | 3.5125 | 9.08 |
| 43 | 4.9817 | 11.59 | 3.5888 | 9.04 |
| 44 | 5.0833 | 11.55 | 3.565  | 9.01 |
| 45 | 5.1850 | 11.52 | 4.0413 | 8.98 |
| 46 | 5.2867 | 11.49 | 4.1175 | 8.95 |
| 47 | 5.3883 | 11.46 | 4.1938 | 8.92 |
| 48 | 5.4900 | 11.44 | 4.2700 | 8.9  |
| 49 | 5.5917 | 11.41 | 4.5463 | 8.87 |
| 50 | 5.6933 | 11.59 | 4.422S | 8.85 |

Fuente: Universidad de Chapingo - México

### **f.1.2 Altura del muro (H)**

La altura que el muro puede alcanzar un límite equivalente a la estatura humana. El muro de contención puede tener entre 0,5 y 3 m de altura ocasionalmente llega a los 3 m de altura, dependiendo mucho del tipo de material, pendiente de la ladera y límite de la fuerza humana para edificar los muros de piedra pircada. En promedio esta altura alcanza 1,5 m.

### **f.1.3 Ancho del muro**

El ancho mínimo de la base mayor del muro (B), debe estar comprendido entre 0,34 a 0,45 H; el ancho del muro en la parte superior (C) debe estar entre los 0,2 y 0,4 m; la profundidad de cimentación mínima (p) debe estar los 0,30 a 0,35 H, generalmente en la base del muro debe emplearse piedras grandes (0,4 a 1 m de diámetro).

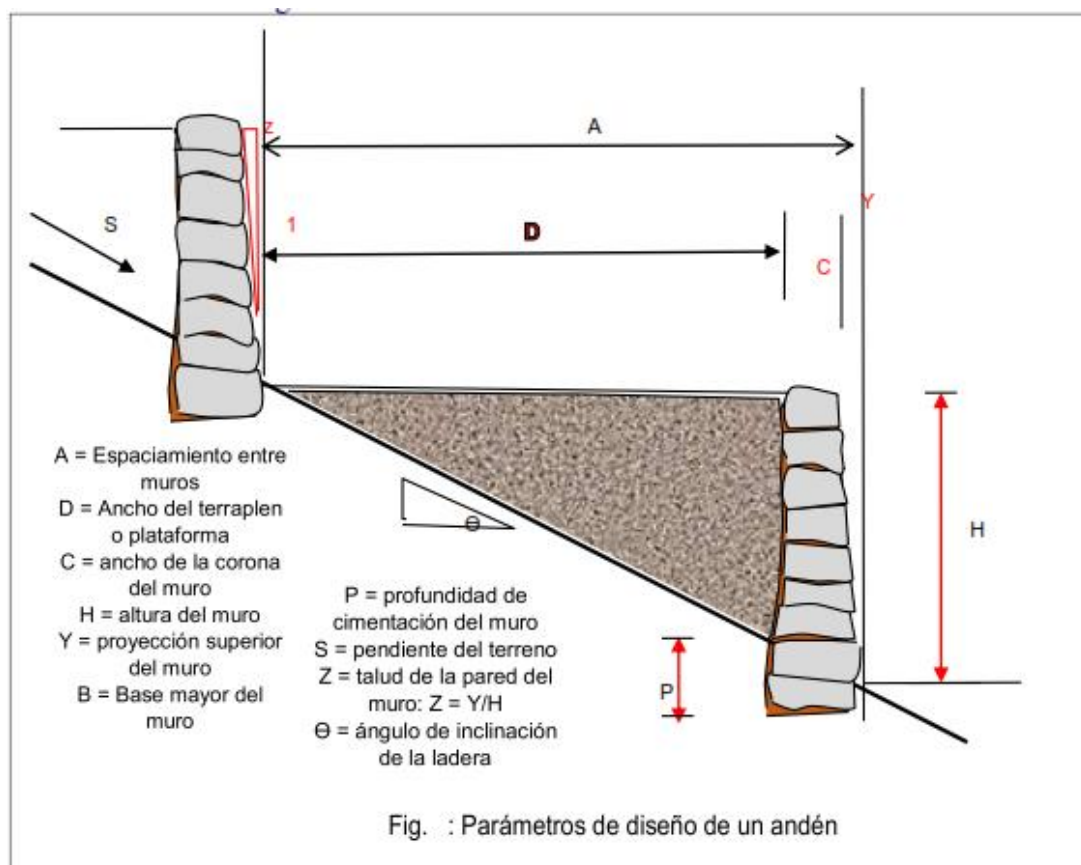


Figura 1.21 Parámetros de diseño de un andén

Fuente: Elaboración propia

#### f.1.4 Longitud del andén

La longitud (L) es limitada por la presencia de obstáculos como cauces naturales, cambios bruscos en la orientación de la ladera, afloramientos de roca o excesiva pedregosidad. Las acequias y caminos se construyen paralelos a los andenes o transversales a los mismos, por tanto, corren a pendiente mínima o, en caso contrario, a máxima pendiente. Con frecuencia, los partidores están en tramos a 0,0% de pendiente.

#### f.1.5 Ancho del andén (D = ancho del banco)

Es la dimensión transversal de la terraza, igual al espaciamiento entre muros (A) menos el espesor del muro (C) y menos la proyección horizontal del talud del muro ( $y = Z \cdot H$ ) (figura 1.23).

#### **f.1.6 Talud del muro de contención (Z)**

Los muros se pircan en seco (sin argamasa de unión) con una inclinación de 0,05:1 a 0,15:1 hacia el interior del banco que sostienen. Esta inclinación favorece la estabilidad de los muros, que también depende de la forma, tamaño y peso de cada roca empleada, del material depositado tras el muro y de un drenaje adecuado.

#### **f.1.7 Pendiente longitudinal de la terraza (S).**

Se define como la pendiente paralela a la curva de nivel de la ladera; dicho parámetro define la velocidad del flujo de agua (depende también del material de la rizósfera), para no ser erosivo y los valores fluctúan entre 0,1 y 0,3%.

**f.1.8 Pendiente transversal de la terraza (S).** La plataforma o terraplén constituye técnicamente el banco del andén y está formado artificialmente por diferentes estratos del suelo. Este relleno de la terraza, no siempre es completamente horizontal, por lo general mantiene una ligera inclinación exterior que viene a ser la pendiente transversal de la terraza que absorbe la precipitación normal de las lluvias y del agua de riego permitiendo una mayor infiltración. Los valores de la pendiente transversal fluctúan entre 0,0 y 0,1%.



Figura 1.22 Terrazas de arroz en Banaue, Filipinas

Fuente: Cita web (29)

## f.2 Análisis de diseño de andenes

Se considera como un muro

### f.2.1 Muros de contención

Como lo indica el nombre, los muros de contención son elementos estructurales diseñados para contener algo; ese algo es un material que, sin la existencia del muro, tomaría una forma diferente a la fijada por el contorno del muro para encontrar su equilibrio estable. Pueden ser construidas de diversos materiales como: concreto armado, concreto ciclópeo, piedras, etc. Según necesidad, economía y criterio del proyectista.

Los muros de contención, son también considerados como obras mecánicas de protección, debido a que están construidas de materiales del lugar (muro de rocas) y también de materiales como sacos rellenos con tierra, neumáticos rellenos con tierra y gravas. Su funcionalidad es buena y de bajo costo en materiales.

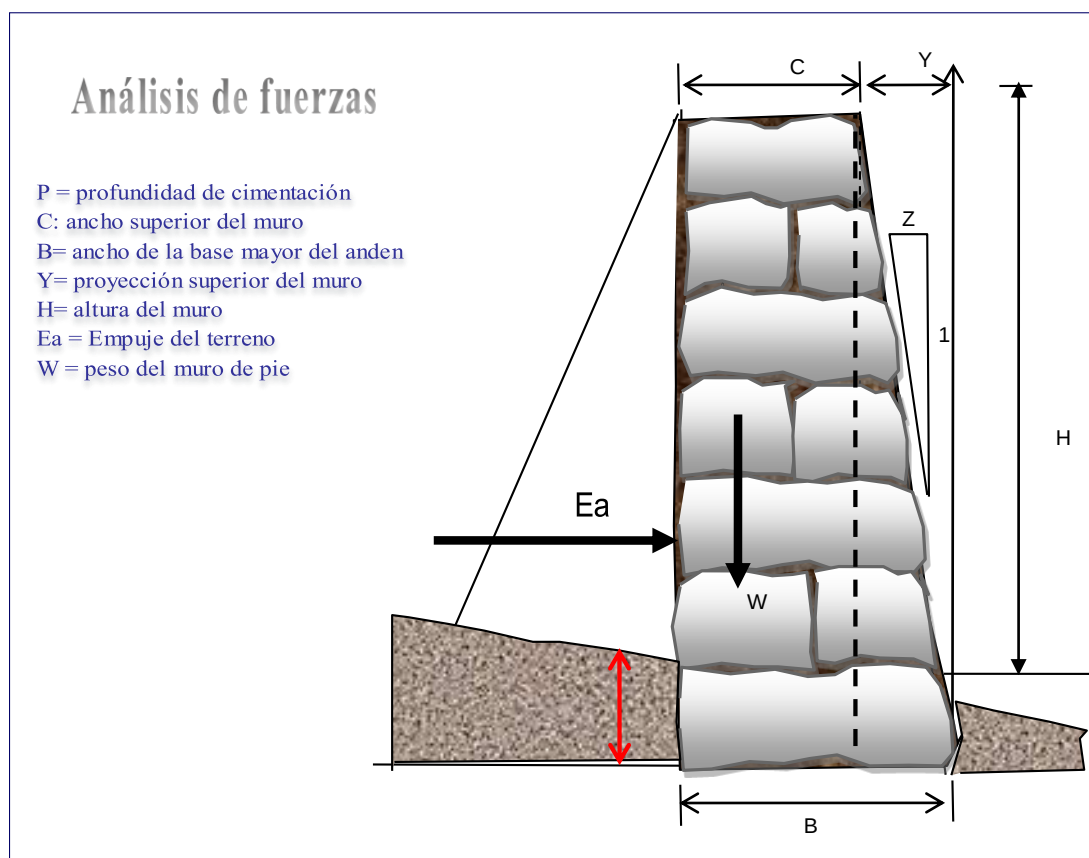


Figura 1.23 Muro de contención construida con material del lugar

Fuente: Elaboración propia

### f.2.2 Estabilidad del andén

Coeficiente de seguridad al deslizamiento

Está representado en la siguiente fórmula:

$$C.S.D = \frac{\sum F_V}{\sum F_H} * f \quad (1.2 - 1.5)$$

Coeficiente de seguridad al volteo, C.S.V:

$$C.S.V = \frac{\sum M_R}{\sum M_V} \quad (1.5 - 2.5); \dots (1.5 - 3.0)$$

Coeficiente de seguridad al hundimiento, C.S.H:

$$\sigma = \frac{\sum F_V}{B} * \left( 1 \pm \frac{6 * e}{B} \right)$$

#### 1.5.1.1.2 Diseño de un muro de contención tipo pirca

- Pendiente del Terreno (S): Representa la inclinación verdadera del terreno (ladera) lo cual puede fluctuar generalmente entre 2% a 60%.
- Talud del muro de contención (Z): El muro nunca es vertical, se construye una pirca con ligera inclinación hacia adentro del terraplén; los valores del talud del muro fluctúan entre 0,05:1 y 0,15:1. El talud define la estabilidad del muro como soporte del perfil del suelo, tal estabilidad también depende de la forma, tamaño y peso de la roca empleada en la piedra.
- Altura del muro (H): El muro de contención puede tener entre 0,5 y 3 m de altura dependiendo mucho del tipo de material, pendiente de la ladera y límite de la fuerza humana para edificar los muros de piedra pircada; en promedio esta altura alcanza 1,5 m, ocasionalmente llega a los 3 m de altura.

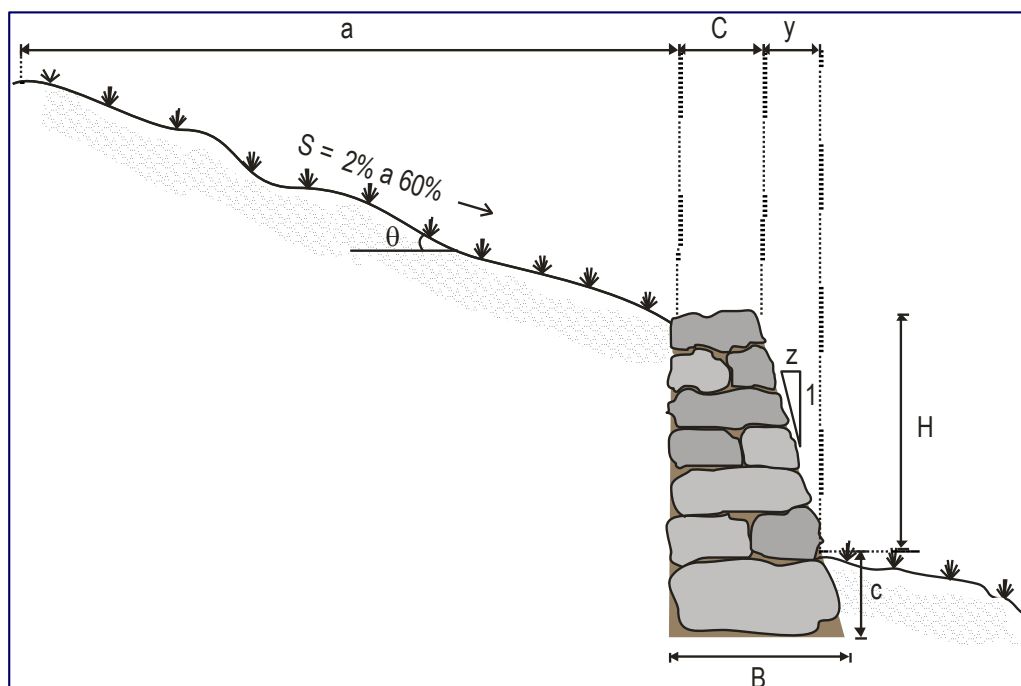


Figura 1.24 Forma de construcción de un muro de contención tipo pirca

Fuente: [www.google.com](http://www.google.com) (dimensionamiento de muros tipo pirca)

De la figura:

S: Pendiente del terreno. (2 – 60 %)

$\theta$ : Grado de inclinación del terreno.

Z: Inclinación del muro de contención.

C: ancho de la corona del muro.

a: Ancho de la plataforma y/o terraplén.

B: Base mayor del muro.

c: Profundidad de cimentación del muro.

y: proyección horizontal de la inclinación.

H: Altura de muro.

El tamaño y forma de la roca son importantes para asegurar una buena estabilidad del muro (los cantos rodados y las piedras pequeñas no aseguran una buena estabilidad, lo que obliga a disminuir la altura del muro; en cambio las piedras grandes de formas regulares garantizan mayor estabilidad, permitiendo construir muros mucho más altos). Generalmente en la base del muro debe emplearse piedras grandes (0,4 a 1,0 m de diámetro).

La altura del muro de contención (H) depende de la textura y profundidad de los suelos de la ladera. Por lo que, los siguientes parámetros deben comprender lo siguiente:

$$B = 0.34H \text{ a } 0.45H \text{ (m)} \quad (\text{i})$$

$$C = 0.20\text{m a } 0.40\text{m}$$

$$c = 0.30H \text{ a } 0.35H \text{ (m)} \quad (\text{ii})$$

$$H = (a+C+y) \tan \theta \quad (\text{iii})$$

$$y = Z \times H \quad (\text{iv})$$

Dónde:

a: Ancho de la plataforma y/o terraplén (m).

C: Ancho de la corona del muro (m).

y: Proyección horizontal del talud del muro.

Z: Talud del muro de contención (0,05 a 0,15).

H: Altura del muro (m).

c: Profundidad de cimentación (m).

A continuación se muestra los resultados del diseño de un muro tipo pirca.

Cuadro 1.11 Diseño de un muro tipo pirca

| Tabla de diseño de un muro de pirca |      |      |      |      |      |          |       |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|----------|-------|
| H                                   | B    | C    | c    | Z    | y    | $\theta$ | a     |
| 0.50                                | 0.17 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 15.00    | 1.64  |
|                                     | 0.23 | 0.40 | 0.18 | 0.15 | 0.08 | 30.00    | 0.39  |
| 1.00                                | 0.34 | 0.20 | 0.30 | 0.05 | 0.05 | 15.00    | 3.48  |
|                                     | 0.45 | 0.40 | 0.35 | 0.15 | 0.15 | 30.00    | 1.18  |
| 1.50                                | 0.51 | 0.20 | 0.45 | 0.05 | 0.08 | 15.00    | 5.32  |
|                                     | 0.68 | 0.40 | 0.53 | 0.15 | 0.23 | 30.00    | 1.97  |
| 2.00                                | 0.68 | 0.20 | 0.60 | 0.05 | 0.10 | 15.00    | 7.16  |
|                                     | 0.90 | 0.40 | 0.70 | 0.15 | 0.30 | 30.00    | 2.76  |
| 2.50                                | 0.85 | 0.20 | 0.75 | 0.05 | 0.13 | 15.00    | 9.01  |
|                                     | 1.13 | 0.40 | 0.88 | 0.15 | 0.38 | 30.00    | 3.56  |
| 3.00                                | 1.02 | 0.20 | 0.90 | 0.05 | 0.15 | 15.00    | 10.85 |
|                                     | 1.35 | 0.40 | 1.05 | 0.15 | 0.45 | 30.00    | 4.35  |

Fuente: Huillca (2013)

### **1.5.1.1.3 Canales de desviación**

También se les conoce como Zanjas de desviación.

Los canales de desviación son estructuras generalmente con una sección transversal rectangular o trapezoidal en tierra desnuda, y cuya ubicación es perpendicular a la pendiente del terreno, a la que cortan, conduciendo el agua de escorrentía a desagües (puede ser quebradas) bien protegidos. Por lo que, su propósito es; interceptar, desviar y transportar el agua de escorrentía proveniente de zonas altas a un lugar donde no ocasionen ningún daño a los campos de cultivo, infraestructuras y viviendas.

Los canales de desviación pueden construirse para proteger las zonas agrícolas de la cuenca susceptible de daño por escurrimiento o para proteger zonas altamente erosionables.

Estos canales se recomienda usarlos en zonas de alta precipitación para evitar la concentración y la alta velocidad del agua superficial, más aún si la pendiente del terreno es alta; pueden también utilizarse como una medida de saneamiento de las tierras donde el nivel freático es bastante superficial, bien sea solos o combinados con drenaje interno.

Los canales de desviación deben ser calculados de manera que sean capaces de transportar la escorrentía proveniente de las lluvias de máxima Intensidad que pueden ocurrir en un período de tiempo determinado.

En términos generales, la mayoría de las obras utilizadas en el control de la erosión están basadas en su diseño con la aplicación de los principios de la hidráulica en canales abiertos. Los canales de desviación geométricamente pueden construirse de forma rectangular, trapezoidal u otras, siendo la más representativa la rectangular. Su uso principalmente se recomienda en zonas de alta precipitación y en zonas de fuerte pendiente donde el escurrimiento de las lluvias causa daño.

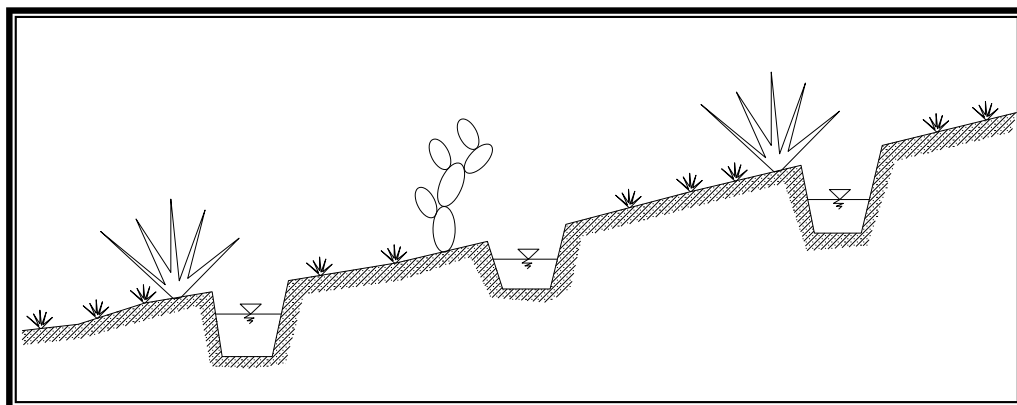


Figura 1.25 Canal de desviación vista en perfil con Cabuya y Penca al borde

Fuente: Pizarro et al (2004)

#### a. Factores que intervienen en el diseño de un canal

**Caudal:** Es la cantidad de agua acumulada durante una precipitación y que vierte en las laderas y quebradas.

**Velocidad de Escurrimiento:** Es la velocidad con que escurre las aguas de lluvia al caer en la superficie y de ella depende la erosión de los suelos.

**Área de Drenaje:** Es la superficie receptora de la lluvia y que puede ser perjudicada por la intensidad de lluvia y la erosión.

**La Pendiente:** La velocidad de escurrimiento depende mucho de ésta ya que este representa la inclinación de la ladera.

**Rugosidad:** Es un factor de resistencia o fricción que hay entre las paredes del canal y el agua de lluvia.

**Forma de Canal:** Es necesario tener en cuenta que un canal que ofrezca una menor superficie de contacto con el agua y tendrá menos resistencia al paso del caudal y una mayor capacidad de conducción.

$$Q = V * A = \frac{A * R^{2/3} * S^{1/2}}{n}$$

Donde:

Q = Caudal transportado por el canal en m<sup>3</sup>/seg.

A = Área transversal al flujo en m<sup>2</sup>.

R = Radio hidráulico en m.

S = Pendiente del canal m/m.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

Los canales de desviación deben ser diseñados de manera que sean capaces de transportar la escorrentía de las lluvias de máxima intensidad que pueden ocurrir en un periodo de tiempo dado.

Las ecuaciones empleadas para el diseño de los canales de tierra, siguen el mismo criterio que un canal revestido y gobiernan el principio de continuidad, ecuación de Manning y la fórmula Racional.

$$Q = V \times A$$

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

Q : Caudal de escurrimiento máximo (m³/s).

V : Velocidad media de agua en canal (m/s).

A : Área de la sección transversal media (m²).

$$Q = \frac{C \times I \times A}{360}$$

Dónde:

Q : Caudal de escurrimiento máximo (m³/s).

C : Coeficiente de escorrentía.

I : Intensidad de lluvia (mm/h).

A : Superficie a drenar (ha).

A continuación se presentan tablas con valores recomendados y que serán empleadas para el adecuado diseño de esta estructura.

Tabla 1.9 Valores recomendados para el coeficiente de escorrentía (C)

| Coeficiente de escorrentía C |               |                       |      |       |       |              |
|------------------------------|---------------|-----------------------|------|-------|-------|--------------|
| Cobertura Vegetal            | Tipo de suelo | Pendiente del terreno |      |       |       |              |
|                              |               | Pronunciada           | Alta | Media | Suave | Despreciable |
|                              |               | 50%                   | 20%  | 5%    | 1%    |              |
| Sin vegetación               | Impermeable   | 0.80                  | 0.75 | 0.70  | 0.65  | 0.60         |
|                              | Semipermeable | 0.70                  | 0.65 | 0.60  | 0.55  | 0.50         |
|                              | Permeable     | 0.50                  | 0.45 | 0.40  | 0.35  | 0.30         |
| Cultivos                     | Impermeable   | 0.70                  | 0.65 | 0.60  | 0.55  | 0.50         |
|                              | Semipermeable | 0.60                  | 0.55 | 0.50  | 0.45  | 0.40         |
|                              | Permeable     | 0.40                  | 0.35 | 0.30  | 0.25  | 0.20         |
| Pastos Vegetación ligera     | Impermeable   | 0.65                  | 0.60 | 0.55  | 0.50  | 0.45         |
|                              | Semipermeable | 0.55                  | 0.50 | 0.45  | 0.40  | 0.35         |
|                              | Permeable     | 0.35                  | 0.30 | 0.25  | 0.20  | 0.15         |
| Hierba, grama                | Impermeable   | 0.60                  | 0.55 | 0.50  | 0.45  | 0.40         |
|                              | Semipermeable | 0.50                  | 0.45 | 0.40  | 0.35  | 0.30         |
|                              | Permeable     | 0.30                  | 0.25 | 0.20  | 0.15  | 0.10         |
| Bosques Densa vegetación     | Impermeable   | 0.55                  | 0.50 | 0.45  | 0.40  | 0.35         |
|                              | Semipermeable | 0.45                  | 0.40 | 0.35  | 0.30  | 0.25         |
|                              | Permeable     | 0.25                  | 0.20 | 0.15  | 0.10  | 0.05         |

\* En zonas que pueden ser quebradas se deben multiplicar a los coeficientes, Así:

En cultivos: multiplicar por 1.10

En hierbas, pastos, vegetación ligera, bosques y densa vegetación, multiplicar por 1.30

Fuente: Razuri (s.f)

Tabla 1.10 Escurrimiento por las laderas

| Velocidad (m/min.)      |                             |                            |                    |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|
| Pendiente de Ladera (%) | Cobertura Vegetal           |                            |                    |
|                         | Vegetación Densa o Cultivos | Pastos o Vegetación Ligera | Ninguna Vegetación |
| 0 – 5                   | 25                          | 40                         | 70                 |
| 5 – 10                  | 50                          | 70                         | 120                |
| 10 – 15                 | 60                          | 90                         | 150                |
| 15 – 20                 | 70                          | 110                        | 180                |

Fuente: UNACH-MEXICO (2009)

Tabla 1.11: Velocidades máximas recomendadas en canales no revestidos

| Características de los suelos                           | V <sub>MAX</sub> Admisible (m/s) |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Arena fina en estado movediza                           | 0.20 – 0.30                      |
| Canales en tierra franca                                | 0.60                             |
| Suelo arenoso                                           | 0.30 – 0.75                      |
| Suelo franco arenoso                                    | 0.75 – 0.95                      |
| Limos aluviales – no coloidales                         | 0.90                             |
| Suelo franco arcilloso (prueba infiltración). Anexo 8.7 | 0.85 – 1.10                      |
| Césped de crecimiento ralo                              | 0.90                             |
| Arcilla consistente                                     | 1.10 – 1.50                      |
| Suelo con vegetación regular                            | 1.20                             |
| Grava fina                                              | 1.20                             |
| Arcilla dura muy coloidal                               | 1.40                             |
| Limos aluviales – coloidales                            | 1.40                             |
| Césped denso, vigoroso                                  | 1.60                             |

Fuente: Razuri (s.f)

Tabla 1.12 Valores de solera o ancho de canal recomendados para diferentes caudales

| Caudal Q (m³/s)     | Solera o ancho de canal b (m) |
|---------------------|-------------------------------|
| Menor de 0.100      | 0.30                          |
| Entre 0.100 – 0.200 | 0.30 – 0.50                   |
| Entre 0.200 – 0.400 | 0.50 – 0.75                   |
| Mayor de 0.400      | 0.75 – 1.00                   |

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de Chapingo – México (2009)

Tabla 1.13 Taludes recomendados para diferentes tipos de suelo (Z: 1)

| Característica de los suelos       | Canales pocos profundos | Canales profundos (H:V) |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Arena suelta                       | 2:1                     | 3:1                     |
| Limo arenoso                       | 1.5:1                   | 2:1                     |
| Limo arcilloso                     | 1:1                     | 1.5:1                   |
| Arcillas compactas o conglomerados | 0.5:1                   | 1:1                     |
| Roca en buenas condiciones         | Vertical                | 0.25:1                  |

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de Chapingo – México (2009)

Tabla 1.14 Pendiente de canal para diferentes tipos de suelos

| Tipos de suelo    | Pendiente S (‰) |
|-------------------|-----------------|
| Suelos sueltos    | 0.5 – 1.0       |
| Suelos francos    | 1.5 – 2.5       |
| Suelos arcillosos | 3.0 – 4.5       |

Fuente: Razuri (s.f)

#### 1.5.1.1.4 Zanjas de infiltración

Son obras de recuperación de suelos que comprende un conjunto de zanjas, construidas de forma manual o mecanizada, cuyo objetivo es captar y almacenar la escorrentía procedente de las cotas superiores como se muestra en la figura 1.26. Se construye transversalmente a la pendiente, sin desnivel y la sección puede ser trapezoidal o rectangular, aunque se aconseja la primera para evitar derrumbes indeseables; Pizarro et al (2004).

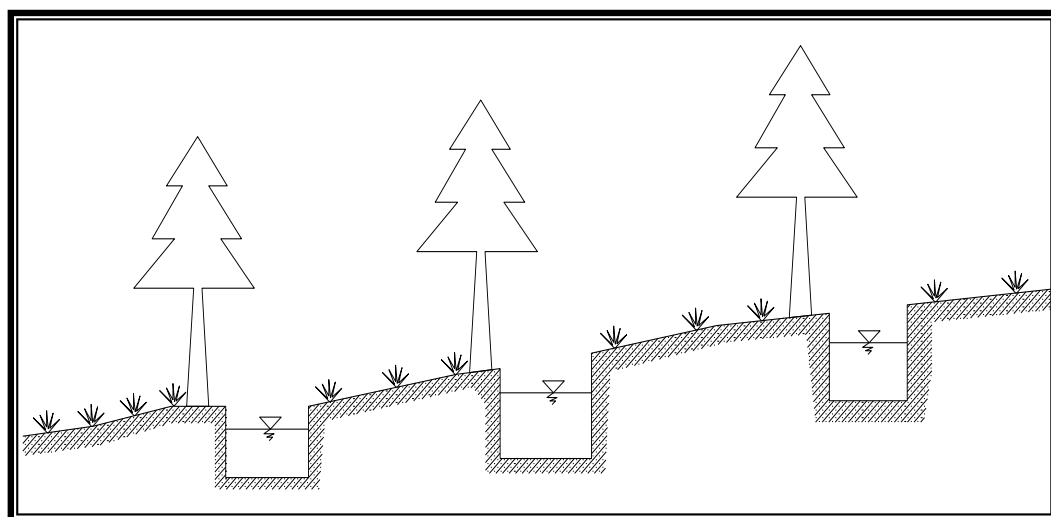


Figura 1.26 Zanjas de infiltración vista en perfil forestado con árboles nativos

Fuente: Pizarro et al (2004)

Como resultado de las malas prácticas del hombre en suelos de aptitud agrícola y/o forestal, se ha provocado una progresiva disminución de la productividad de los terrenos, especialmente en sectores aledaños a las ciudades, en lo que cada individuo pugna por encontrar un área de terreno para edificar viviendas, peor aún, en zonas de pendiente fuerte (laderas).

Ante esta situación, algunas Instituciones como el PRONAMACHS (hoy AGRORURAL) fomentó la incorporación de las técnicas de recuperación de suelos y aprovechamiento de las aguas de lluvia en muchos sectores de la región Ayacucho y otros, lo que ha permitido frenar esta tendencia negativa.

En este sentido, una de las prácticas más comunes son las zanjas de infiltración. Su popularidad radica en la fácil aplicación, requiere de una rápida capacitación a los obreros, es una obra bonificada por el Estado y se obtienen buenos resultados silvícolas, silvopastoril (prendimiento, crecimiento y desarrollo).

Es así que, para este estudio se ha constituido como una obra de protección de escorrentías para aquellas zonas en laderas con viviendas y es como una opción tecnológica válida para el pequeño propietario, en términos de la oportunidad de protección de los recursos naturales, que permitirá establecer actuaciones valoradas en una nueva función de sustentabilidad económica, social y ambiental.

Las zanjas de infiltración son canales sin pendiente contruidos en laderas, los cuales tienen por objetivo captar el agua que escurre, evitando procesos erosivos de manto, permitiendo que se acumule el agua de lluvia, para que infiltre más agua en el suelo.

#### **a. Diseño de las zanjas de infiltración**

Se requiere para el diseño lo siguiente:

Pizarro et al (2004), considera:

##### **a.1 Diseño hidrológico de zanjas de infiltración**

El diseño de las obras de conservación y aprovechamiento de suelos y aguas, debe considerar previamente cuatro conceptos hidrológicos; el periodo de retorno, las curvas intensidad-duración-frecuencia, la velocidad de infiltración de los suelos, y el coeficiente de escorrentía, para así diseñar las obras que favorecen la infiltración de aguas lluvias en condiciones desfavorables. Esta situación permite trabajar con un margen de seguridad, el cual minimiza el riesgo de que las obras sean sobrepasadas, de tal manera que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería hidrológica.

**b. El espaciamiento entre zanjas** debe ser tal que permita un control adecuado de la erosión.

**c. La capacidad de captura de agua de las zanjas** debe permitir el almacenaje de un determinado volumen de escorrentía producido por la lluvia.

El diseño consiste en determinar el ancho del borde superior, ancho de la base, profundidad de corte, espaciamiento de una zanja a otra, los taludes y las características que determinan la sección transversal, estos dependen principalmente del tipo de suelo y las características de la lluvia en la zona.

Las Zanjas de Infiltración, consiste en pequeños surcos que sigue las curvas de nivel ( $S=0\%$ ). Cuanto mayor sea la pendiente del terreno las zanjas deben estar más cerca de una a otra.

La inclinación del talud puede variar según la textura del suelo, así:

- Textura suelta 1:1 a 2:1 (H:V)
- Terreno firme 0.5:1 a 1:1 (H:V)

De la figura 1.27, se tiene lo siguiente:

Dónde:

Y2 : Longitud de corte (cm).

H2 : Profundidad de corte (cm).

B : Longitud de bordo (cm).

H : Altura de bordo (cm).

Para el diseño de la Zanja de Infiltración se utilizará la siguiente ecuación:

$$A = E * C * I_{m\acute{a}x.} * 10$$

Dónde:

A : Capacidad de Almacenamiento (l/ml).

E : Espaciamiento de una zanja a otra (IH) en m.

C : Coeficiente de escorrentía (tabla 1.15).

Imáx : Intensidad máxima de precipitación (cm/día).

10 : factor de corrección.

Para el uso de la fórmula anterior se hará uso de la siguiente tabla.

Tabla 1.15 Valores del coeficiente “C” para el cálculo del escurrimiento

| Tipo de vegetación  | Topografía                        | Textura del suelo |       |      |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------|-------|------|
|                     |                                   | Gruesa            | Media | Fina |
| Bosque              | Plano (0 – 5% pendiente)          | 0.10              | 0.30  | 0.40 |
|                     | Ondulado (6 – 10% de pendiente)   | 0.25              | 0.35  | 0.50 |
|                     | Escarpado (11 – 30% de pendiente) | 0.30              | 0.50  | 0.60 |
| Pastizales          | Plano (0 – 5% pendiente)          | 0.10              | 0.30  | 0.40 |
|                     | Ondulado (6 – 10% de pendiente)   | 0.16              | 0.36  | 0.55 |
|                     | Escarpado (11 – 30% de pendiente) | 0.22              | 0.42  | 0.60 |
| Terrenos Cultivados | Plano (0 – 5% pendiente)          | 0.30              | 0.50  | 0.60 |
|                     | Ondulado (6 – 10% de pendiente)   | 0.40              | 0.60  | 0.70 |
|                     | Escarpado (11 – 30% de pendiente) | 0.52              | 0.72  | 0.82 |

Fuente: Razuri (s.f)

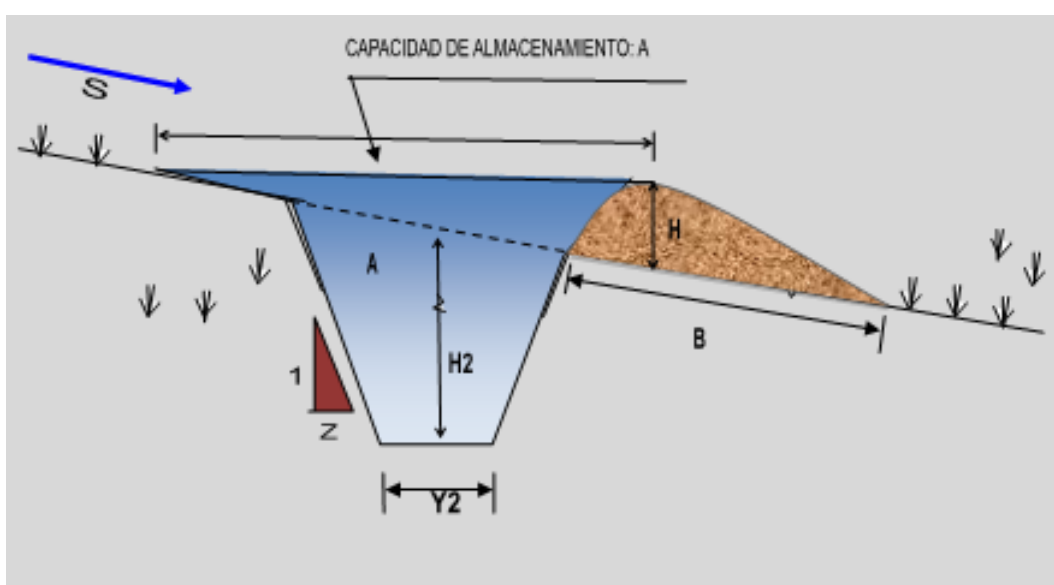


Figura 1.27 Partes de la zanja de infiltración

Fuente: Universidad Nacional de Chapingo (1991)

Y2 = Longitud de corte (cm).

H2 = Profundidad de corte (cm).

Tabla 1.16 Dimensionamiento y capacidad de almacenamiento de la zanja de infiltración

| <b>Pendiente %</b> | <b>H</b> | <b>B</b> | <b>H2</b> | <b>Y2</b> | <b>Capacidad de Almacenamiento A (l/ml)</b> |
|--------------------|----------|----------|-----------|-----------|---------------------------------------------|
| 5                  | 40       | 80       | 36        | 60        | 1413                                        |
|                    |          | 90       | 40        | 60        | 1428                                        |
|                    |          | 100      | 44        | 60        | 1443                                        |
|                    | 45       | 90       | 45        | 60        | 1789                                        |
|                    |          | 100      | 50        | 60        | 1805                                        |
|                    |          | 110      | 47        | 70        | 1822                                        |
|                    | 50       | 100      | 58        | 60        | 2208                                        |
|                    |          | 110      | 52        | 70        | 2227                                        |
|                    |          | 120      | 57        | 70        | 2245                                        |
| 10                 | 40       | 80       | 36        | 60        | 765                                         |
|                    |          | 90       | 40        | 60        | 780                                         |
|                    |          | 100      | 44        | 60        | 795                                         |
|                    | 45       | 90       | 45        | 60        | 969                                         |
|                    |          | 100      | 43        | 70        | 985                                         |
|                    |          | 110      | 47        | 70        | 1002                                        |
|                    | 50       | 100      | 56        | 60        | 1196                                        |
|                    |          | 110      | 52        | 70        | 1214                                        |
|                    |          | 120      | 57        | 70        | 1232                                        |
| 15                 | 45       | 90       | 45        | 60        | 695                                         |
|                    |          | 100      | 43        | 70        | 712                                         |
|                    |          | 110      | 47        | 70        | 729                                         |
|                    | 50       | 100      | 56        | 60        | 858                                         |
|                    |          | 110      | 52        | 70        | 877                                         |
|                    |          | 120      | 57        | 70        | 895                                         |
|                    | 55       | 110      | 58        | 70        | 1039                                        |
|                    |          | 120      | 63        | 70        | 1059                                        |
|                    |          | 130      | 68        | 70        | 1079                                        |
| 20                 | 45       | 90       | 45        | 60        | 559                                         |
|                    |          | 100      | 50        | 60        | 575                                         |
|                    |          | 110      | 47        | 70        | 592                                         |
|                    | 50       | 100      | 56        | 60        | 690                                         |
|                    |          | 110      | 52        | 70        | 708                                         |
|                    |          | 120      | 57        | 70        | 726                                         |
|                    | 55       | 110      | 58        | 70        | 834                                         |
|                    |          | 120      | 63        | 70        | 855                                         |
|                    |          | 130      | 68        | 70        | 875                                         |

|    |    |     |    |    |     |
|----|----|-----|----|----|-----|
| 30 | 50 | 100 | 56 | 60 | 521 |
|    |    | 110 | 52 | 70 | 539 |
|    |    | 120 | 57 | 70 | 557 |
|    | 55 | 110 | 58 | 70 | 630 |
|    |    | 120 | 63 | 70 | 650 |
|    |    | 130 | 68 | 70 | 671 |
|    | 60 | 120 | 69 | 70 | 750 |
|    |    | 130 | 65 | 80 | 772 |
| 40 | 50 | 100 | 56 | 70 | 436 |
|    |    | 110 | 52 | 70 | 455 |
|    |    | 120 | 57 | 70 | 473 |
|    | 55 | 110 | 58 | 70 | 528 |
|    |    | 120 | 63 | 70 | 548 |
|    |    | 130 | 68 | 70 | 568 |
|    | 60 | 120 | 69 | 70 | 628 |
|    |    | 130 | 65 | 80 | 650 |

Fuente: Universidad Nacional de Chapingo (1991)

#### 1.5.1.1.5 Diques para el control de cárcavas

Gómez et al (2011) considera:

##### a. Definición

Por cárcava se entiende una incisión en el terreno provocada por el flujo del agua.

##### b. Control de cárcavas

Por control de cárcavas se entiende el conjunto de actuaciones dirigidas a frenar el crecimiento y, con el tiempo, rellenar y restaurar las cárcavas presentes en una explotación. Así sustituimos una cárcava por una zona en la que la escorrentía fluye de manera controlada. Un dique de retención aislado no supone por sí solo una medida de control de cárcava si ésta es alimentada por otras que vienen de aguas arriba sobre las que no se actúa.

##### c. Criterios generales

Existen dos tipos de cárcavas: continuas y discontinuas. Las discontinuas son cárcavas que aparecen de manera aislada, normalmente en una ladera. Las continuas son cárcavas que forman redes que se extienden a lo largo de una pequeña cuenca y que

normalmente van creciendo en tamaño a medida que nos aproximamos a la zona situada ladera abajo.

#### **d. Principios básicos de control de cárcavas**

1. Mejorar las condiciones de la zona desde donde vierte el agua a la cárcava para reducir la escorrentía (por ejemplo aumentando la cobertura por vegetación).

2. Desviar, si fuera necesario, toda o parte de la escorrentía que entra en la cárcava.

Un ejemplo donde esto puede ser necesario es en cárcavas formadas a causa de cunetas mal diseñadas.

3. Estabilizar la cárcava mediante medidas estructurales (casi siempre por diques de retención) y si fuera necesario revegetación.

La figura 1.28 muestra un esquema de control del conjunto de la red de cárcavas comenzando con el agua que viene ya concentrada aguas arriba.

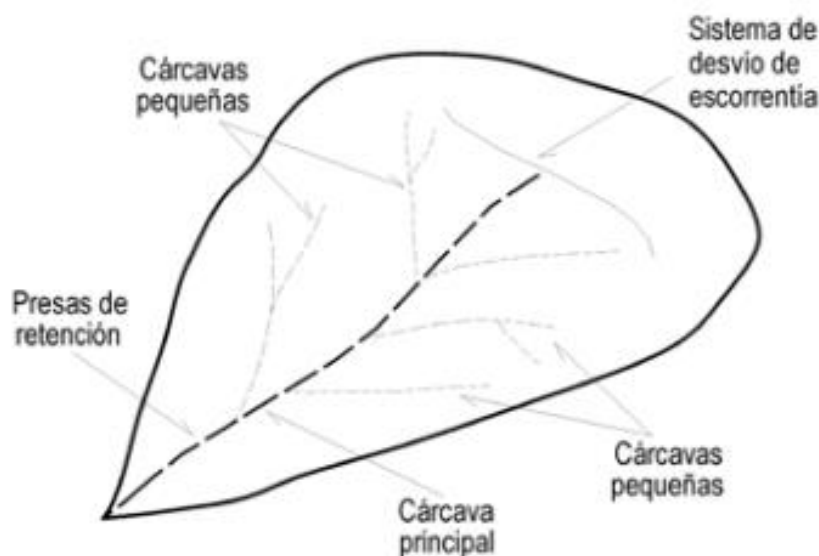


Figura 1.28 Esquema conceptual de control de una red de cárcavas

Fuente: Gómez et al (2011)

#### **e. Espaciamiento**

El objetivo de los diques de retención que se construyen a lo largo de la cárcava no es retener todo el agua, sino frenar su velocidad para que el sedimento deposite antes de que el agua pase por lo alto del muro de retención y con el tiempo rellenar la cárcava y restaurarla como se muestra en la figura 1.29. En ocasiones la cárcava no se rellena del todo, pero deja de crecer en tamaño y se puede considerar controlada.

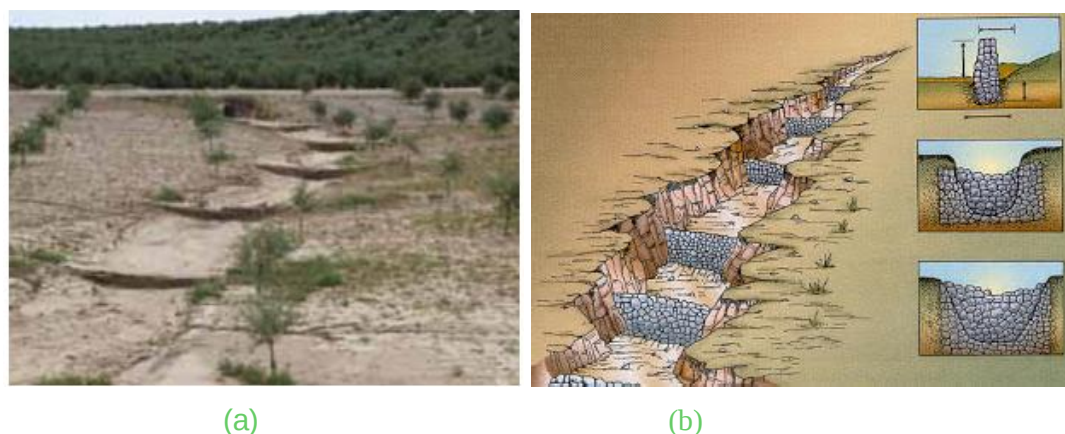


Figura 1.29 Vista de varios diques de retención espaciados

Fuente: Gómez et al (2011)

La regla básica para espaciar entre sí los diques de retención a lo largo de la cárcava, es hacerlo para intentar aproximarse a una situación en la que el nivel máximo del agua detrás de un dique llegue hasta el pie del dique de retención situado inmediatamente aguas arriba, se muestra en la figura 1.30. Se trata de lograr que no quede ninguna sección de la cárcava en la que el agua no esté retenida para reducir su velocidad.

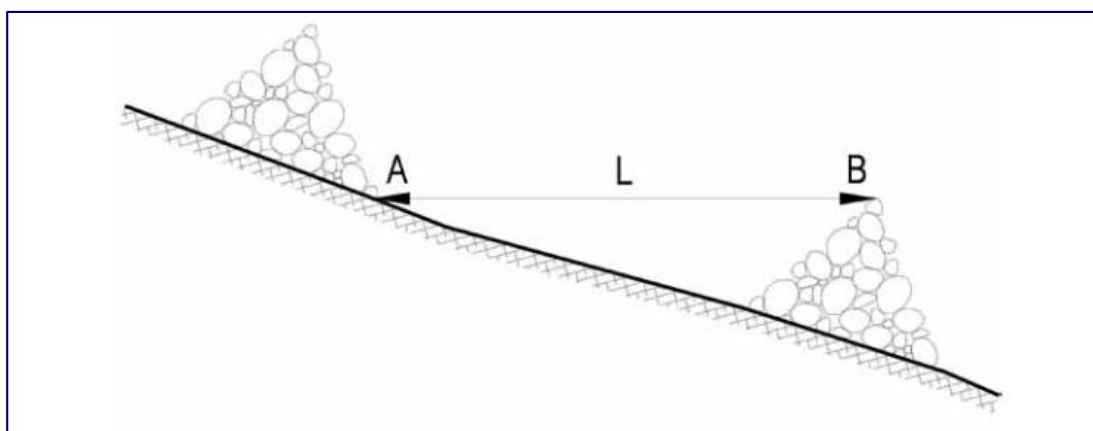


Figura 1.30 Espaciamiento entre diques de retención (L)

Fuente: Gómez et al (2011) a partir de Gray y Leiser (1989)

La línea A-B marca el punto de máxima elevación de agua.

Este espaciamiento dependerá de la pendiente de la cárcava y de la altura del dique. De la tabla 1.17 se determinará cuál es el espaciamiento de manera práctica.

Conviene no olvidar que son distancias aproximadas y que se pueden variar ligeramente si eso permite un diseño más eficaz.

Por motivos de costo este criterio general es difícil de seguir exactamente en campo, por ello el espaciamiento recomendado se encuentra en la siguiente tabla e incorpora un factor de corrección empírico donde se asume un mayor espaciamiento para el diseño.

Tabla. 1.17 Espaciamiento óptimo, en metros, entre diques de retención

| <b>Pendiente<br/>cárcava<br/>%</b> | <b>2</b> | <b>6</b> | <b>10</b> | <b>16</b> | <b>20</b> | <b>24</b> | <b>30</b> | <b>40</b> |
|------------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Altura dique m</b>              |          |          |           |           |           |           |           |           |
| 0.1                                | 17       | 6        | 3         | 2         | 2         | 1         | 1         | 1         |
| 0.3                                | 50       | 17       | 10        | 6         | 5         | 3         | 2         | 2         |
| 0.5                                | 83       | 28       | 17        | 11        | 8         | 4         | 3         | 3         |
| 0.7                                | 117      | 39       | 23        | 15        | 12        | 6         | 5         | 4         |
| 0.9                                | 150      | 50       | 30        | 19        | 15        | 8         | 6         | 5         |
| 1.1                                | 183      | 61       | 37        | 23        | 19        | 9         | 8         | 6         |
| 1.3                                | 217      | 72       | 44        | 27        | 22        | 11        | 9         | 7         |
| 1.5                                | 250      | 83       | 50        | 32        | 25        | 13        | 10        | 8         |
| 1.7                                | 283      | 95       | 57        | 36        | 29        | 15        | 12        | 9         |
| 1.9                                | 317      | 106      | 64        | 40        | 32        | 17        | 13        | 10        |

Fuente: Gómez et al (2011) a partir de Coppin y Richards (1990)

Estas obras de control y recuperación tienen el propósito de proteger el corte de la cabecera de la cárcava (pequeño surco excavado por las aguas de escorrentía) y al mismo tiempo, reducir la velocidad del flujo de las corrientes esporádicas o intermitentes de la escorrentía y disminuir la pendiente en el cauce. Muchas veces no son económicamente rentables si el área a proteger tiene poco potencial productivo, sin embargo, sirven para contrarrestar el progreso de la cárcava y proteger el resto del área contribuyente y el área aguas abajo.

#### **f. Cabeceras de las cárcavas**

El control de la cárcava debe comenzar desde su cabecera, que es el lugar donde empieza a formarse. Los bordes superiores de esta cárcava deben rodearse plantando vegetación (herbácea y/o leñosa según los casos) para frenar la velocidad del agua y hacer que sus raíces retengan mejor el terreno.

### g. Criterios básicos de diseño de diques de retención

1. Por seguridad y coste hay que procurar construir diques de menos de 1.2 m de altura, medida desde el punto donde empieza a verter el agua (aliviadero).
2. Todos, no importa lo pequeños que sean, deben hacerse dejando una zona rebajada (en el centro) para evacuar el exceso de agua cuando rebose sin que se salga por los lados del muro. Esto se llama aliviadero.
3. En la zona donde cae el agua de este aliviadero se debe reforzar el lecho para amortiguar el impacto del agua que cae. Como regla aproximada esta zona de disipación de energía debe tener una longitud entre 1.5 y 2 veces la altura efectiva del dique.
4. Un buen diseño debe considerar la forma y tamaño de estos elementos. Hacerlo reducirá los problemas como que el agua se abra camino por los bordes del dique haciéndolo ineficaz, o éste se derrumbe al formarse un socavón al pie del mismo.

### h. Cálculos a efectuar

#### 1. Anchura del dique de retención

La anchura del dique de retención,  $A_p$ , eso es la longitud de dique para cerrar la cárcava viene dada por esta ecuación:

$$A_p = A_{fc} + \left( \frac{H_{m\acute{a}x.} * (A_{sc} - A_{fc})}{P_c} \right)$$

Donde:

$A_{fc}$  = Anchura de la cárcava en su fondo.

$A_{sc}$  = Anchura de cárcava en el punto más alto de la sección donde se construye el dique.

$P_c$  = Profundidad total de la cárcava.

$H_{m\acute{a}x.}$  = Altura efectiva del dique (medida desde la altura máxima de agua en la coronación del aliviadero).

#### 2. Volumen máximo de sedimentos

El volumen máximo de sedimento que se puede almacenar detrás de un dique de retención,  $V_s$  viene dado por esta ecuación:

$$V_s = 0.5 * H_e * A_p * D_p * \cos(\psi)$$

Donde:

$D_p$  = Separación entre diques de retención, y el ángulo correspondiente a la pendiente de la cárcava.

### 3. Caudal de diseño

Se recomienda calcularlo a partir de la tormenta con un periodo de retorno de 25 años usando la fórmula del método racional siguiente:

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

Donde:

q = Caudal de diseño ( $m^3/s$ ).

C = Coeficiente de escorrentía, (tabla 1.18 en la página siguiente).

i = Intensidad de lluvia (mm/h) correspondiente a ese periodo de retorno y por una duración igual al tiempo de concentración de la zona aguas arriba del dique de retención.

A = Área aportadora ( $km^2$ ).

El tiempo de concentración, T se puede calcular a partir de diferentes fórmulas, siendo una de las más usadas la de Kirpich:

$$T_c = 0.0195 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (minutos).

L = Máxima longitud recorrida por la escorrentía (m).

S = Pendiente (en tanto por uno) media del área aportadora.

Para usar la tabla 1.18 debe clasificar el suelo de acuerdo a una de las cuatro categorías que establece el SCS:

Grupo A: Suelos con alta velocidad de infiltración cuando están saturados. Son generalmente suelos profundos, bien drenados y de textura arenosa o franco-arenosa.

Grupo B: Suelos con velocidad de infiltración moderada en saturación. Son generalmente suelos de profundidad media, bien drenados y de textura franca o franco-limosa.

Grupo C: Suelos con baja velocidad de infiltración en saturación. Son generalmente suelos con una capa que limita el flujo de agua y de texturas finas.

Grupo D: Suelos muy baja velocidad de infiltración. Son generalmente suelos arcillosos de carácter expansible, suelos con una limitación a la infiltración muy cercana a la superficie o muy poco profundos y sobre un material parental muy poco permeable. Son normalmente suelos de texturas finas.

Tabla 1.18 Coeficientes de escorrentía para el método racional en función del uso del suelo, clase hidrológica de suelo y pendiente. Coeficientes para tormentas con periodos de retorno menor de 25 años y para periodos de retorno mayores de 25 años

| Uso de suelo    | A    |      |      | B    |      |      | C    |      |      | D    |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 0-2% | 2-6% | >6%  | 0-2% | 2-6% | >6%  | 0-2% | 2-6% | >6%  | 0-2% | 2-6% | >6%  |
| Cultivo         | 0.08 | 0.13 | 0.16 | 0.11 | 0.15 | 0.21 | 0.14 | 0.19 | 0.26 | 0.18 | 0.23 | 0.31 |
|                 | 0.14 | 0.18 | 0.22 | 0.16 | 0.21 | 0.28 | 0.20 | 0.25 | 0.34 | 0.24 | 0.29 | 0.41 |
| Pastos          | 0.12 | 0.20 | 0.30 | 0.18 | 0.28 | 0.37 | 0.24 | 0.34 | 0.44 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
|                 | 0.15 | 0.25 | 0.37 | 0.23 | 0.34 | 0.45 | 0.30 | 0.42 | 0.52 | 0.37 | 0.50 | 0.62 |
| Bosque          | 0.05 | 0.08 | 0.11 | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.10 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.16 | 0.20 |
|                 | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.18 | 0.12 | 0.16 | 0.20 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| Zona industrial | 0.67 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 0.69 | 0.68 | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.70 |
|                 | 0.85 | 0.85 | 0.86 | 0.85 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.87 | 0.86 | 0.86 | 0.88 |
| Aparcamientos   | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.87 |
|                 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.96 | 0.97 |

Fuente: Schawb (1993)

#### 4. El aliviadero

Se debe diseñar de manera que sea capaz de evacuar el caudal de diseño rebosando por el centro del dique de retención sin que ésta alcance los lados del dique y comience a erosionar las paredes de la cárcava. Normalmente son de secciones rectangulares o trapezoidales, siendo mejores las segundas porque son más eficaces desalojando ramas y restos que pueden quedar atrapados.

La tabla 1.19 ayuda a dimensionar ese aliviadero una vez conocido el caudal de diseño.

Tabla 1.19 Capacidad de un aliviadero de sección trapezoidal o parabólica en función de su anchura y altura (calado máximo de agua permisible sobre la coronación del aliviadero)

| <b>Anchura de aliviadero m</b>                       | <b>0.2</b> | <b>0.6</b> | <b>1.2</b> | <b>1.8</b> | <b>2.4</b> | <b>3.0</b> | <b>3.6</b> | <b>5.2</b> |
|------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Capacidad de evacuar caudal (m<sup>3</sup>/s)</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Altura de agua en aliviadero m</b>                |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>0.15</b>                                          | 0.02       | 0.05       | 0.10       | 0.15       | 0.20       | 0.25       | 0.30       | 0.35       |
| <b>0.30</b>                                          | 0.04       | 0.10       | 0.25       | 0.40       | 0.50       | 0.60       | 0.75       | 0.90       |
| <b>0.45</b>                                          | 0.07       | 0.20       | 0.50       | 0.70       | 0.90       | 1.20       | 1.40       | 1.50       |
| <b>0.60</b>                                          | 0.11       | 0.35       | 0.70       | 1.10       | 1.50       | 1.80       | 2.20       | 2.50       |
| <b>0.75</b>                                          | 0.15       | 0.50       | 1.00       | 1.50       | 2.00       | 2.50       | 3.00       | 3.30       |
| <b>0.90</b>                                          | 0.20       | 0.60       | 1.30       | 2.00       | 2.70       | 3.30       | 3.90       | 4.70       |

Fuente: Pathak et al (2005)

#### 1.5.1.1.6 Sistemas de forestación y reforestación

Los bosques son necesarios para mantener en buen estado otros recursos de gran importancia para la vida, entre los cuales podemos mencionar el agua, el aire, los suelos, los animales silvestres y microorganismos.

Es la práctica que permite la regeneración de la vegetación natural mediante la implantación de árboles en combinación con el establecimiento de pastizales. En aquellos suelos que presentan limitaciones para el desarrollo de cultivos agrícolas debe mantenerse la cubierta vegetal, lo que constituye la forma más efectiva y económica de controlar la erosión. Es importante considerar las especies con las cuales se va a reforestar debiendo analizar sus hábitos de crecimiento, vigor, compatibilidad de asociación con otras plantas, resistencia a plagas y enfermedades, características morfológicas, rentabilidad económica, existiendo plantas autóctonas que cumplan con estos requisitos.

#### 1.5.2 Plan de control de la erosión

La conservación de suelos, si se concentra sobre los efectos producidos por el agua, puede ser desarrollada mediante tres controles según Fournier (1975): control del suelo, control de la vegetación y control del agua.

El proceso de “erosión” hace que sea necesario introducir un plan de control de erosión, cuya aplicación minimizará los riesgos de derrumbes y erosión superficial;

introduciendo, para ello, medidas correctivas, mediante la desviación y captación de aguas, la interposición de barreras de vegetación y estructuras de ingeniería.

### **1.5.3 Vulnerabilidad**

Por vulnerabilidad se denota la incapacidad de una comunidad para absorber, mediante el autoajuste los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse a ese cambio, que para la comunidad constituye un riesgo. La vulnerabilidad determina la intensidad de los daños que produzca la ocurrencia efectiva del riesgo sobre la comunidad; Jiménez (2002), citado por Gómez (2003).

La vulnerabilidad puede comprenderse como aquel conjunto de condiciones a partir de las cuales una comunidad está o queda expuesta al peligro de resultar afectada por una amenaza, sea de tipo natural, antrópica o socio-natural; Gómez (2003).

Ser vulnerable es ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad de recuperarse de ello. No toda situación en que se halla el ser humano es vulnerable. Hay situaciones en las que la población sí está realmente expuesta a sufrir daño de ocurrir un evento natural peligroso. Hay otras, en cambio, en que la gente está rodeada de ciertas condiciones de seguridad, por lo cual puede considerarse protegida; Gómez (2003).

## **1.6 Herramientas disponibles para el análisis**

### **1.6.1 El papel de los SIG y teledetección en los estudios de erosión**

En los últimos años gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías de información geográfica (TIG) han visto la luz una gran cantidad de artículos y trabajos que emplean estos soportes de sistemas informáticos para la gestión de información georreferenciada (SIG y Teledetección aplicada en su mayoría) para llevar a cabo análisis de erosión a muy diferentes escalas.

La Teledetección es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales y si se quiere, realizar su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación.

La integración de la Teledetección y los SIG, permite ampliar notablemente las posibilidades gráficas de la cartografía convencional, facilitando su análisis visual al usuario. Según Chuvieco, el aporte de la Teledetección a los SIG, se centra

principalmente en la obtención de información de ciertas variables de interés y en la actualización de la información ya generada; esta segunda opción es la que interesa para cumplimentar uno de los objetivos de este trabajo.

Los sistemas de información geográfica presentan grandes ventajas a la hora de implementar un modelo para el análisis de erosión, ya que permiten:

- Procesar y operar gran cantidad de datos que permiten el cálculo de las distintas variables implicadas en el modelo, pudiendo obtener como resultado una capa para cada factor de la ecuación matemática.
- Ejecutar operaciones y análisis entre capas.
- Observar la distribución espacial de los resultados.
- Crear escenarios posibles.

Visualizar y generar cartografía que muestre de forma clara y concisa los resultados obtenidos.

Los métodos de predicción se utilizan para la evaluación de los riesgos potenciales y actuales de erosión, para la planificación de las cuencas hidrográficas; y también pueden ser empleados para determinar relaciones entre las características de las cuencas y los procesos de erosión.

Los modelos determinísticos proporcionan buenos resultados a pesar de su mayor complejidad. La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos es un modelo paramétrico que permite estimar la Erosión Potencial y Actual y realizar simulaciones con diferentes escenarios, previa calibración de los parámetros del modelo.

#### **1.6.1.1 Modelos de caja blanca disponibles**

El pronóstico del escurrimiento y la erosión hídrica evolucionó de la colecta de datos para comparar prácticas, a modelos empíricos simples o complejos, y recientemente a modelos basados en procesos; Mccool et al (1990). Los modelos demandan consideraciones conceptuales y necesitan información básica medida en campo para integrar procesos a nivel temporal y espacial. La aplicación de modelos requiere conocer sus componentes principales, los parámetros y procesos involucrados, sus fortalezas y debilidades e información para integrar la base de datos.

En los modelos basados físicamente, resaltan los procesos de escorrentía superficial (ES), de remoción del suelo por salpicado y por escorrentía superficial ES, de erosión

entre surcos y en surcos, el transporte, el depósito y la producción de sedimentos. Así tenemos:

#### - WEPP

Modelo simulación del Servicio de Conservación de Suelos de USA que pretende ser el método oficial para medida de la erosión de los suelos en USA. Se trata de un potente programa de ordenador orientado sobre los múltiples procesos que intervienen en la erosión. Su programación es muy compleja, en base a conceptos teóricos de climatología, hidrología, física de suelos y agronomía.

Al no ser un modelo estadístico (caja negra; únicamente basado en las observaciones), WEPP es muy poderoso, no está limitado a sitios concretos, trabaja en cualquier localidad pues WEPP emula los conocimientos científicos sobre la erosión hídrica.

#### - EUROSEM. Respuesta europea al WEPP

Calcula la erosión laminar y en surcos (de manera independiente) a lo largo de una ladera (en cada punto y al final el total de suelo perdido) y en una cuenca. Mide también la deposición en las pequeñas depresiones de las laderas.

Erosión hídrica. Evaluación. WEPP

Maneja conceptos teóricos de gran número de procesos: desprendimiento por las gotas de lluvia entre regueros, transporte en regueros y entre regueros, deposición en regueros y entre regueros, balance hídrico (precipitación, evaporación, transpiración, infiltración, etc), recubrimiento vegetal, variación en el tiempo (simulaciones del crecimiento, abandono de residuos, etc), variaciones temporales de la topografía, rugosidad superficial, sellado superficial, cultivos, manejo (laboreo, fitosanitarios, etc).

Prestaciones: capacidad para evaluar la distribución de las pérdidas (y deposiciones) del suelo con carácter temporal y espacial.

Los datos pueden ser obtenidos:

- Diarios, mensuales y anuales.
- Simple tormenta.
- Continuo.
- Simple cultivo.

- Rotaciones.
- Regadío.
- Laboreo.
- Manejo.

Cuatro condiciones:

- Clima.
- Relieve.
- Suelo.
- Manejo.

Clima, se puede introducir directamente los datos eligiendo una estación climatológica de USA u obtener los datos con un programa específico: CLIGEN. Calcula los parámetros necesarios para evaluar la capacidad erosiva de las lluvias según WEPP. Obtiene datos de tormentas (intensidades, duraciones a partir de datos mensuales y anuales, precipitaciones, temperaturas medias, mínimas y máximas, radiaciones, heladas) en función de la historia climática de la zona, mediante cálculos estadísticos de probabilidades. Se pueden obtener los datos climáticos directamente de las estaciones climatológicas para los Estados Unidos y también se proporciona un software para calcular los parámetros climáticos necesarios para estaciones fuera del territorio USA.

#### - Modelo hidrológico MODIPÉ

MODIPÉ es un acrónimo derivado de Modificación de Precipitaciones por Escorrentía que considera lo siguiente:

- Es un modelo hidrológico sobre recolección de agua basado en el método del número de curva.
- Estima la infiltración (o disponibilidad hídrica) en una ladera degradada antes y después de la intervención proyectada.
- Distingue entre zonas receptoras y exportadoras de escorrentía (áreas de recepción y de imprevio, respectivamente), promediando la infiltración de ambas zonas.

- Contempla la posibilidad de crear trampas de agua en la ladera para que las unidades sistematizadas puedan retener toda la lluvia y escurrimiento que produzca el aguacero de cálculo.
- Está especialmente indicado para el diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas o semiáridas.

### 1.7 Definición de términos

#### - Aptitud de los suelos

Conjunto de cualidades del suelo para sustentar determinados usos y su respuesta a determinado manejo; Ruiz (2005).

#### - Andenes

"Los andenes están constituidos por plataforma horizontales que van escalando las laderas, adaptándose a las sinuosidades topográficas. Las plataformas con superficies cultivables están conformadas por un muro de contención de piedra"; Doig (2002).

#### - Antrópico

Antrópico se designa todo lo que es relativo al ser humano, por oposición a lo natural, y especialmente se aplica a todas las modificaciones que sufre lo natural a causa de la acción de los humanos.

El hombre muchas veces altera con su accionar el equilibrio natural, originando el llamado sistema antrópico, integrado por elementos que surgen del desarrollo tecnológico, urbanístico, industrial, y cultural en general. Casi no podemos hallar un paisaje donde el hombre no ha colocado su impronta, y lamentablemente, generado riesgos, que también se llaman antrópicos, por ser el hombre el que los causa; cita web (1).

#### - Base de Datos Geográfica

Una base de datos geográfica (BDG) es una colección de datos organizados de tal manera que sirvan para aplicaciones de sistemas de información geográfica, y permitan el almacenamiento estructurado de los datos, de acuerdo a criterios espaciales, tipos de consultas y gestión de información geográfica.

#### - Bioingeniería de suelos

La bioingeniería de suelos es una ciencia que combina conceptos de mecánica, biología y ecología con el propósito de crear una estructura, “viva” para estabilizar el terreno. Ejemplo, sembrar pacholí (*Vetiveria zizanioides*), Una vez establecida, su mantenimiento es mínimo y de fácil control, lo cual hace al pacholí excelente para el control de sedimentos. Las partículas de suelo, que de otro modo pasarían al fondo de quebradas, lagos o al mar, van formando terrazas cuando ésta se siembra en hileras al contorno.

#### - Capacidad de Uso del Suelo

Forma de clasificar el suelo a través de la cual se permite ordenar de acuerdo a su relativa adaptabilidad a ciertos cultivos, indicando las dificultades y riesgos que se pueden presentar al usarlos. Basada en la capacidad de la tierra para producir, señalando las limitaciones naturales de los suelos. Las clases convencionales para definir la Capacidad de Uso son ocho, se identifican con números romanos (I – VIII) y se ordenan según sus crecientes limitaciones y riesgos de uso; Ruiz (2005).

#### - Cobertura vegetal

Vegetación que actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Sus componentes aéreos, como hojas troncos y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, disminuyendo su efecto erosivo al no actuar directamente sobre el suelo, mientras que las raíces contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo; Ruiz (2005).

#### - Cuenca de Agua

El área en la cual el agua corre hacia un punto específico. Cita web (19).

#### - Degradación

Se define como el conjunto de procesos que provocan, en forma real o potencial, una disminución de la capacidad productiva del suelo; FAO (1975).

#### - Degradación de las tierras

Se entiende la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada, en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un

proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como:

- (i) La erosión del suelo causada por el viento o el agua.
- (ii) El deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas o de las propiedades económicas del suelo, y
- (iii) La pérdida duradera de vegetación natural.

Cita web (9).

#### - Desertificación

Proceso por el cual un territorio que no posee las condiciones climáticas de un desierto adquiere las características de éste, como resultado de la destrucción de su cubierta vegetal y también a causa de una fuerte erosión. La sobreexplotación de los suelos, el abuso de pesticidas y plaguicidas, el pastoreo excesivo y la tala indiscriminada de árboles son factores que favorecen la desertificación; cita web (9).

#### - Desertificación

Se entiende la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas; Convención de las Naciones Unidas (1977).

#### - Detención Superficial

Se define la Detención Superficial como el agua que llega a la superficie y se “almacena” en las pequeñas depresiones del terreno. Si rebosa se puede generar escorrentía superficial. Cita web (33).

#### - Erodabilidad

Que es la vulnerabilidad del suelo frente a la erosión. Se consideran las características del suelo y el tratamiento que se le dé. Depende de la textura, la estabilidad estructural y la capacidad de infiltración.

#### - Erosión

Se denomina erosión al proceso de sustracción o desgaste de la roca del suelo intacto (roca madre), por acción de procesos geológicos exógenos como las corrientes superficiales de agua o hielo glaciar, el viento, o los cambios de temperatura; cita web (31).

#### - Erosión del suelo

La erosión del suelo es un fenómeno natural que es el causante de la pérdida gradual de terreno. La erosión es el proceso por el cual las partículas del suelo se mueven de un sitio a otro por medio de la acción del agua, viento u otro efecto. Es un proceso natural hasta que el hombre interviene utilizando equipo mecánico y acelerando el mismo con el movimiento de terreno para usos agrícolas, desarrollo urbano y para cualquier otro tipo de construcción.

#### - Erosión hídrica

En términos generales, la erosión hídrica es aquella producida por el agua lluvia a través del golpeteo de sus gotas sobre la superficie del terreno y cambios en regímenes de humedad, generando desprendimiento y arrastre de partículas y masas de suelo. Cita web (31).

#### - Erosión laminar

Es la remoción por efecto de la lluvia o del escurrimiento de las aguas, de una capa más fina del suelo.

#### - Erosión en surcos

Es la remoción del agua de escorrentía formando pequeños surcos.

#### - Erosión en cárcavas (zanjas)

Es la remoción del suelo por el agua formando zanjones que no pueden ser tapados con equipo agrícola comunes.

#### - Erosionabilidad

La erosionabilidad o erodabilidad, es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos.

#### - Escurrimiento superficial

Flujo de agua desde un área que ocurre sobre la superficie del suelo. (Ruiz, 2005).

#### - Estudio Agrológico

Es la caracterización de unidades de suelos en terreno y su representación cartográfica en mapas, distinguiéndose series y fases de suelos; Ruiz (2005).

#### - Estructura del suelo

Se refiere al tipo de agrupación de las partículas de un suelo para formar agregados; Ruiz (2005).

#### - Economía de agua

Conjunto de medidas para la regulación y la conservación de las reservas del agua. Cita web (9).

#### - Erosión

Pérdida de la capa vegetal que cubre la tierra, dejándola sin capacidad para sustentar la vida. La erosión tiene un lugar en lapsos muy cortos y esta favorecida por la pérdida de la cobertura vegetal o la aplicación de técnicas inapropiadas en el manejo de los recursos naturales renovables (suelo, agua, flora y fauna); cita web (9).

#### - Erosión neta

Se denomina como erosión neta (En) a la diferencia entre la erosión y la sedimentación ocurrida en una ladera, expresada en metros cúbicos por hectárea o toneladas por hectárea; Brea (2010).

#### - Escorrentía

Agua de lluvia que circula, desliza o corre libremente sobre la superficie del suelo hacia los ríos y otros cuerpos de agua; cita web (19).

#### - Eutrofización

En ecología el término eutrofización, designa el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema. El uso más extendido se refiere específicamente al aporte más o menos masivo de nutrientes inorgánicos en un ecosistema acuático. Eutrofo se llama a un ecosistema o un ambiente caracterizado por una abundancia anormalmente alta de nutrientes; cita web (5).

#### - Infiltración

Es el proceso a través del cual el riego o agua de lluvia, ingresa al suelo a través de la superficie, hacia sus capas inferiores, en forma vertical y horizontal; cita web (25).

#### - Interceptación

Se define la Interceptación como la parte de lluvia retenida por la vegetación; cita web (33).

#### - Lucha contra la desertificación

Se entiende las actividades que forman parte de un aprovechamiento integrado de la tierra de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas para el desarrollo sostenible y que tienen por objeto:

- (i) La prevención o la reducción de la degradación de las tierras.

(ii) La rehabilitación de tierras parcialmente degradadas.

(iii) La recuperación de tierras desertificadas; Convención de las Naciones Unidas (1977).

#### - Pendiente del terreno

La pendiente se expresa como el grado de declive que presenta el terreno; Ruiz (2005).

#### - Percolación

Es el movimiento del agua dentro del suelo.

#### - Perfil de suelo

El perfil es la sección vertical de un suelo desde la superficie del terreno hasta la roca madre, que constituye la base para el estudio y clasificación de los suelos. El desarrollo del perfil manifiesta la intensidad de la acción de los procesos formadores del suelo; Ruiz (2005).

#### - Precipitación

Vásquez (2000), define que la precipitación es toda forma de agua cuyo origen está en las nubes, y cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo, garúa, o nieve.

En hidrología, el tipo de precipitación de mayor importancia es la lluvia, por lo cual es la variable de entrada más significativa en el sistema hidrológico.

#### - Quebradas

Es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca; Ordoñez (2011).

#### - Reguero

Canal que se hace en la tierra para conducir por él el agua para el riego.

#### - La Retención Superficial

Es un término que engloba a dos componentes del ciclo hidrológico que son la Interceptación y la Detención Superficial. Se define como el agua procedente de la lluvia que queda retenida o bien en la vegetación o bien en el suelo constituyendo lagunas; cita web (33).

#### - Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

#### - Sostenibilidad

Proceso de racionalización de las condiciones sociales, económicas, educativas, jurídicas, éticas, morales y ecológicas fundamentales que posibiliten la adecuación del incremento de las riquezas en beneficios de la sociedad sin afectar al medio ambiente, para garantizar el bienestar de las generaciones futuras. También puede denominarse sustentabilidad.

#### - Tasa de infiltración

La tasa de infiltración también denominada como capacidad de infiltración de un suelo, es la máxima cantidad de agua de lluvia que el mismo puede absorber en la unidad de tiempo y en condiciones previamente definidas.

#### - Tasa de sedimentos

No todo lo que se calcula como erosión en la ecuación universal de pérdida de suelo es sedimento ya que universal de pérdida de suelo es sedimento ya que universal de pérdida de suelo es sedimento ya que universal de pérdida de suelo es sedimento ya que parte del material irá siendo depositado o atrapado. Esa parte que sigue su ruta hasta un punto tal como una presa es llamada tasa de sedimentos.

#### - Teledetección

Técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales.

#### - Terraza

Una terraza es un terraplén de tierra, un canal o una combinación de lomo y canal, que se construyen a través de una ladera del terreno para disminuir la longitud de la pendiente del terreno y controlar el escurrimiento asociado con precipitaciones excesivas.

#### - Tierra

Se entiende el sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos ecológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema; Convención de las Naciones Unidas (1977).

#### - Tormenta

Vásquez (2000), define que una tormenta es una lluvia generada por una perturbación atmosférica y que tiene características definidas.

Las tormentas se analizan de los pluviogramas que registran los pluviómetros en un lugar determinado.

- Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas

Se entiende aquellas zonas en las que la proporción entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,05 y 0,65, excluidas las regiones polares y subpolares; Convención de las Naciones Unidas (1977).

- Velocidad de infiltración

La capacidad que tiene un suelo para absorber agua se la mide a través de la velocidad de infiltración.

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Ubicación del proyecto

##### a. Ubicación Política

Región : Ayacucho  
 Provincia : Huamanga  
 Distrito : Tambillo, Quinoa, Acocro, Acos Vinchos  
 Cuenca : Yucaes

##### b. Ubicación Geográfica

Altitud : 2,450 a 4,450 m.s.n.m.  
 Norte : 8554896.00  
 Este : 0579185.00  
 Ubigeo : 050101

#### Breve descripción del proyecto

La cuenca formada por el río Yucaes, esta red hídrica está alimentado desde el río Ventanillaqocc, Tintay, Canalqasa, que juntamente con los ríos Chumahuaqo y Huaqrasimi forman el río Yucaes, que es una vertiente del río Chacco.

La cuenca del Río Yucaes tiene un área de 692.80 Km<sup>2</sup>. En general, a mayor área de cuenca, mayor cantidad de escorrentía superficial y, consecuentemente, mayor flujo superficial.

### - Vías de acceso y límites

#### ➤ Área de influencia

El área de influencia de la presente investigación es la localidad de Yucaes del Distrito de Tambillo.

#### ➤ Accesibilidad

El acceso a la zona del proyecto es por la única vía asfaltada (Ayacucho - Huanta) a una distancia de 11.4 Km., desde Ayacucho hasta el valle de Muyurina, a partir de una trocha carrozable al sur este a una distancia de 1.500 km parte al valle del Niño Yucaes.

Cuadro 2.1 Accesibilidad a la cuenca de Yucaes

| Accesibilidad a la cuenca de Yucaes |        |           |                    |                |         |
|-------------------------------------|--------|-----------|--------------------|----------------|---------|
| Tramo                               |        | Vía       | Tipo de transporte | Recorrido      |         |
| De                                  | A      | Acceso    |                    | Distancia (Km) | Tiempo  |
| Ayacucho                            | Yucaes | Asfaltada | Colectivo          | 11.40          | 20 min. |

Fuente: Elaboración propia

### - Clima

Según la clasificación de Koeppen, el clima del área de estudio corresponde a un templado subhúmedo (estepa de valles interandinos bajos) conocido como “clima de montaña baja”, es propio de la región sierra, correspondiente principalmente a los valles interandinos situados entre los 1000 y 3000 m.s.-n.m.

Generalmente, las temperaturas sobrepasan los 20° C y la precipitación anual se encuentra por debajo de los 500 mm. Aunque en las partes más elevadas húmedas y orientales, pueden alcanzar y aun sobrepasar los 1200 mm. Según la clasificación climática de W. Koeppen.

### - Suelo

Soporte de las actividades humanas y deben tenerse en cuenta las características que le suministran mayor aptitud para su uso, por lo cual debe evitarse deterioros irreversibles, que constituye un medio receptor de impactos que se traducen en erosión, pérdida de la fertilidad, contaminación, compactación, etc., la clasificación de los suelos depende de sus elementos formadores como el clima, material,

geomorfología, vegetación, intervención antrópica así como sus características físico-químicas.

Los suelos de la cuenca de Yucaes, en general son suelos superficiales debido a que poseen una capa arable de 11 cm, 16 cm y 21 cm. en el mejor de los casos, aumentando gradualmente hacia algunas partes altas. La pendiente determina el grado de erosión, mecanización de las labores culturales y el tipo de cultivos, el distrito presenta diversidad de pendientes desde muy ligeras hasta muy fuertes, en sus generalidades muy accidentadas.

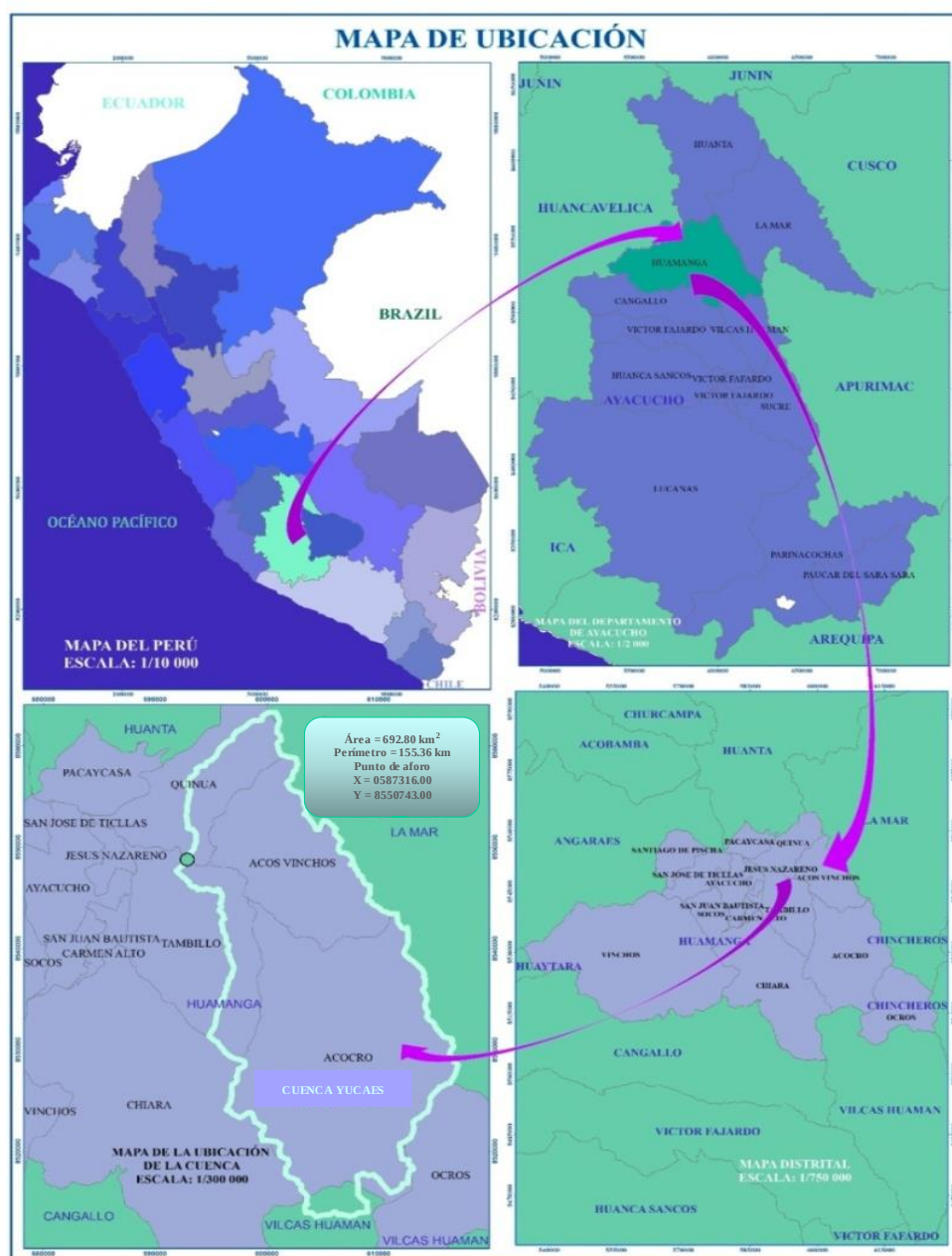


Figura 2.1 Plano de ubicación

Fuente: Elaboración propia

## **2.2 Materiales y equipos**

### **2.2.1 Materiales de escritorio**

Los materiales de escritorio del presente proyecto son los siguientes:

- Papel bond.
- Cuaderno A4.
- Lapiceros, corrector, resaltador, etc.
- Libreta de campo.
- Baldes, tablas, soguilla, plástico, etc.

### **2.2.2 Equipos y herramientas**

#### **a) Equipos**

- Laptop.
- Calculadora.
- Fotocopiadora.
- Impresora.
- Software Arc Gis).
- Cilindro infiltrómetro.
- Cronómetro.

#### **b) Herramientas**

- Herramientas (comba, wincha, nivel de mano, escuadra, etc.).

## **2.3 Enfoque metodológico**

### **2.3.1 Problemas específicos**

1. ¿No se tiene estudios de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos, para el manejo del suelo y del agua de la cuenca Yucaes?
2. ¿No se tiene estudios con la ecuación universal de pérdida de suelo USLE?
3. ¿No se hacen permanentemente trabajos de manejo y conservación de suelos y aguas en laderas para evitar la erosión hídrica en la cuenca de Yucaes?

### **2.3.2 Investigación aplicada**

Para Murillo (2008), la investigación aplicada recibe el nombre de “investigación práctica o empírica”, que se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los

conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. El uso del conocimiento y los resultados de investigación que da como resultado una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad.

Albitres (2000) define la investigación aplicada o tecnológica cuando estructura procedimientos, innova estrategias, crea y prueba artefactos, y estima su valor programático.

### 2.3.3 Método

Método cualitativo y cuantitativo.

#### 2.3.3.1 Nivel de investigación

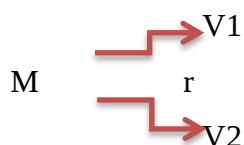
Correlacional

#### 2.3.3.2 Diseño de investigación

No experimental

Diagrama simbólico de Diseño de la investigación:

El diagrama formalizado o simbólico de la investigación, Sánchez (1983).



Dónde:

M = Muestra

V1 = Cuenca hidrográfica

V2 = Erosión hídrica (degradación)

r = relación

### 2.2.3.3 Población y muestra

- Población
  - La población de la EPIA
- Muestra
  - Nivel de confiabilidad

### 2.3.3.3.1 Nivel de confiabilidad. Fórmula de Kuder y Richardson

#### 1. Confiabilidad del instrumento

Es medir el efecto que la variable independiente tiene sobre la variable dependiente, esto implica la necesidad de utilizar un instrumento o técnica que sea Válida y Confiable.

Todo instrumento de recolección de datos debe resumir dos requisitos esenciales: validez y confiabilidad, según Caballero (2014).

Se estima la confiabilidad de un instrumento de medición cuando permite determinar que el mismo, mide lo que se quiere medir, y aplicado varias veces, indique el mismo resultado. Hernández et al (2006) indican que “la confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto, produce iguales resultados”.

Se calcula luego de establecer la validez, para lo que existen diversos procedimientos para calcular la confiabilidad de un instrumento, la cual se conoce al producir el coeficiente de confiabilidad tipo dicotómico de Kuder & Richardson (cuadro 2.2) cuyos valores oscilan entre **cero (0)** y **uno (1)**, es decir de confiabilidad nula a confiabilidad total. Según el criterio siguiente:

Cuadro 2.2 Valores de los coeficientes de confiabilidad tipo dicotómico

| Alternativas cualitativas | Alternativas cuantitativas |
|---------------------------|----------------------------|
| SÍ                        | 1                          |
| NO                        | 0                          |

Fuente: Caballero (2014)

Correspondió a los sujetos participantes responder **SÍ o 1**, cuando consideraron la perspectiva afirmativa y **NO o 0**, cuando la consideraron negativa.

### 1.1. Método para la determinación del coeficiente de confiabilidad

#### - Técnica de Kuder & Richardson

Esta técnica se basa en el supuesto de que cada ítem del instrumento constituye una prueba paralela, de modo que cada ítem es tratado como paralelo de todos los demás ítems. Esta técnica sólo es aplicable en aquellos casos en que las respuestas a cada ítem puede calificarse como 1 ó 0. La fórmula para calcular la confiabilidad de un instrumento con  $n$  ítems será:

$$KR_{20} = \frac{k}{k-1} * \left( 1 - \frac{\sum p * q}{\sigma_t^2} \right)$$

Esta es la fórmula 20 de Kuder & Richardson (KR-20)

Donde:

$KR_{20}$  = Coeficiente de confiabilidad o fidelidad.

$K$  = número de ítems que contiene el instrumento.

$P$  = Porcentaje de personas que responde correctamente cada ítem.

$q$  = Porcentaje de personas que responde incorrectamente cada ítem (complemento de  $p$ ).

$\sigma_1^2$  = Suma de las varianzas de los ítems.

$\sigma_t^2$  = Varianza total del instrumento.

$p_1 * q_1$  = Variación de cada pregunta.

$\sum p * q$  = Sumatoria de la varianza individual de los ítems.

La ecuación  $KR_{20}$  representa un coeficiente de consistencia interna del instrumento, que proporciona la media de todos los coeficientes de división por mitades para todas las posibles divisiones del instrumento en dos partes; Magnusson (1995).

La ventaja de la técnica Kuder & Richardson es que permite calcular la confiabilidad con una sola aplicación del instrumento y no requiere el diseño de pruebas paralelas. Sin embargo su limitación reside en que es aplicable solo a instrumento con ítem dicotómicos, es decir, que pueden ser codificado con 1- 0.

## 2.4 Procedimiento

La metodología de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo considera como una forma de determinar la tasa media anual de pérdida de suelo por la erosión hídrica, asimismo, analizar con otros modelos. La primera ecuación para calcular la pérdida de suelo la publicó Zingg (1940) estableciendo solamente la importancia de la pendiente y su longitud. Posteriormente se incorporaron los factores de manejo de cultivo, prácticas de conservación, erodabilidad del suelo. Hasta 1965 con la ecuación desarrollada por Wischmeier et al (1965), se dieron una serie de propuestas de ecuaciones que llegaron a incluir hasta nueve factores. En la presente investigación para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica se siguieron los pasos siguientes:

- Campo y gabinete
- Técnica: Observación y evaluación.
- Etapas metodológicas

### Primera etapa

- Información base
  - \* Revisión bibliográfica (nacional e internacional)
  - \* Descripción del área de estudio.
  - \* Obtención y características de la información base: Registros meteorológicos.
  - \* Cartografía digitalizada. ArcGIS. Traspaso digital de la información
  - \* Modelo USLE y su versión revisada RUSLE.
  - \* Software ArcGIS

### Segunda etapa

Realizar:

- Delimitación de la cuenca hidrográfica de Yucaes.
- Mapa de sub áreas de la cuenca.
- Mapa de la red hidrográfica.
- Mapa de suelos.
- Mapa de capacidad de uso mayor.
- Mapa de pendientes.
- Mapa del factor R.

- Mapa del factor K.
- Mapa del factor LS.
- Mapa Temático de erosión potencial.
- Mapa Temático de erosión actual.

### **Tercera etapa**

- Modelos de estimación de la erosión. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), en inglés (Universal Soil Loss Equation, USLE). Modelo USLE y su versión revisada RUSLE.
- Estimación de aporte de sedimentos.
- Aplicación del SIG para la estimación de la pérdida de suelos de acuerdo al grado de tolerancia exigida por instituciones acreditadas y sujetas a erosión hídrica.

### **Cuarta etapa**

- Determinación de caudales
  - \* Método racional
  - \* Método de Mac Math
  - \* Método de Iszkowski
- Diseño de las prácticas mecánico-estructurales

### CAPÍTULO III

#### RESULTADOS

En la presente investigación se tienen los siguientes resultados:

#### 3.1 Determinación de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos

##### 3.1.1 Parámetros agrológicos

Se consideraron los parámetros agrológicos propios para el estudio de la presente investigación como: textura (arena, limo), materia orgánica, estructura del suelo, permeabilidad, etc.

Utilizando el mapa de suelos de la FAO, se procesó con el software ArcGis el mapa temático de suelos lámina 04 (Anexo 8.9), determinándose la distribución de cada una de éstas categorías en la cuenca de Yucaes los tipos de suelos con sus respectivas áreas se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.1 Tipo de suelos y sus respectivas áreas de la cuenca de Yucaes

| <b>Tipo de Suelo</b> | <b>Área</b> |
|----------------------|-------------|
| Vitric Andosols (Tv) | 368.96      |
| Lithosols (l)        | 323.84      |

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la tabla 8.1 características generales del suelo del mundo (FAO), para cálculo de susceptibilidad de erosión del suelo, se determinó el porcentaje de arena, limo, materia orgánica, la estructura granular y permeabilidad del suelo, como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.2 Características generales de suelos de la cuenca Yucaes

| Características                 | Sand<br>Topsoil<br>%<br>Arena | Silt<br>Topsoil<br>%<br>Limo | OC<br>Topsoil<br>%<br>MO | Estructura<br>Granular<br>del suelo | Permeabilidad<br>del Suelo |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>Vitric<br/>Andosols (Tv)</b> | 64.5                          | 26.2                         | 1.4                      | 2                                   | 2                          |
| <b>Lithosols (I)</b>            | 59                            | 16.2                         | 0.97                     | 3                                   | 3                          |

Fuente: Elaboración propia

Los datos de los cuadros 3.1 y 3.2 permitirán calcular el factor de erodabilidad (K).

- Utilizando el mapa temático de capacidad de uso mayor lámina 05 (Anexo 8.9), se clasificó la capacidad de uso mayor de la tierra según Tosi (1969) y Campos (2016).

Los resultados del cuadro 3.3 se utilizará para el cálculo de los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación del suelo (P).

Cuadro 3.3 Clasificación de capacidad de uso mayor y sus respectivas áreas de la cuenca Yucaes

| Clasificación de capacidad de uso mayor                                             |                         |   | Ayacucho<br>Área<br>(km <sup>2</sup> ) | Cuenca<br>Yucaes Área<br>(km <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---|----------------------------------------|---------------------------------------------|
|  | Cultivos en<br>limpio   | A | 1400.00                                | 21.95                                       |
|  | Cultivos<br>permanentes | C | 30.00                                  | 0.47                                        |
|  | Pastos                  | P | 11300.00                               | 177.19                                      |
|  | Producción<br>forestal  | F | 1550.00                                | 24.31                                       |
|  | Protección              | X | 29901.04                               | 468.88                                      |

Fuente: Elaboración propia

- Se realizó la prueba de infiltración en la ladera de estudio donde se ha determinado una velocidad de infiltración básica de 7.2 mm/h, donde el tipo de suelo es Franco Arcilloso según el cuadro 8.35 y 8.36, el resultado de la prueba de infiltración se utilizará para el diseño de canales de desviación.

## **Discusión**

Los suelos situados en la zona se evaluaron para su transformación en el factor K, utilizando la clasificación internacional de suelo FAO / UNESCO para la obtención de un mapa de suelos a nivel mundial.

Se trata de una clasificación que utiliza como caracteres diferenciables propiedades del suelo medibles cuantitativamente (en el campo o en el laboratorio). Las clases establecidas quedan definidas de una manera muy rigurosa y precisa.

### **3.1.2 Parámetros geomorfológicos**

Según el Anexo 8.4, se llega al siguiente resultado

Se elaboran los mapas temáticos y conjuntamente con los cálculos realizados permitieron alcanzar la propuesta geomorfológica.

Cuadro 3.4 Resumen de parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Yucaes

| Parámetros                                     |                                                           |                                       |                               | Unidad             | Cuenca Yucaes     |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| Área de la cuenca                              |                                                           |                                       |                               | Km <sup>2</sup>    | 692.80            |
| Perímetro                                      |                                                           |                                       |                               | Km                 | 155.36            |
| Parámetros de forma                            | Factor de cuenca                                          | Coeficiente de Compacidad (Gravelius) |                               | 1                  | 1.66              |
|                                                |                                                           | Factor de forma                       | Longitud (el curso más largo) | Km                 | 59.63             |
|                                                | Ancho Medio                                               |                                       | Km                            | 11.62              |                   |
|                                                | Radio de Circularidad                                     |                                       | 1                             | 0.36               |                   |
|                                                | Densidad de Drenaje                                       |                                       | km                            | 1.31               |                   |
|                                                | Factor de Forma                                           |                                       | 1                             | 0.19               |                   |
|                                                | Rectángulo equivalente                                    |                                       | Lado Mayor                    | Km                 | 67.40             |
|                                                |                                                           |                                       | Lado Menor                    | Km                 | 10.28             |
|                                                | Longitud total de los ríos de diferentes grados           |                                       | Orden 1                       | Km                 | 452.86            |
|                                                |                                                           |                                       | Orden 2                       | Km                 | 248.90            |
|                                                |                                                           |                                       | Orden 3                       | Km                 | 124.81            |
|                                                |                                                           |                                       | Orden 4                       | Km                 | 38.75             |
|                                                |                                                           |                                       | Orden 5                       | Km                 | 31.66             |
|                                                |                                                           |                                       | Orden 6                       | Km                 | 8.54              |
| Parámetros de relieve                          | Curva Hipsométrica                                        |                                       |                               | -                  | -                 |
|                                                | Polígono de Frecuencia                                    |                                       |                               | -                  | -                 |
|                                                | Altitud Máxima de la Cuenca                               |                                       |                               | m.s.n.m.           | 4450              |
|                                                | Altitud Mínima de la Cuenca                               |                                       |                               | m.s.n.m.           | 2500              |
|                                                | Desnivel total de la Cuenca                               |                                       |                               | Km                 | 1.95              |
|                                                | Altitud de Frecuencia Media                               |                                       |                               | m.s.n.m.           | 3610.00           |
|                                                | Altitud Media de la Cuenca                                |                                       |                               | m.s.n.m.           | 3588              |
|                                                | Altura Máxima del cauce                                   |                                       |                               | m.s.n.m.           | 4450              |
|                                                | Altura más frecuente                                      |                                       |                               | m.s.n.m.           | 3962.50 - 4206.25 |
|                                                | Pendiente de la cuenca (sist. del rectángulo equivalente) |                                       |                               | %                  | 2.89              |
| Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca | Tipo de corriente                                         |                                       |                               | -                  | Perenne           |
|                                                | Densidad de drenaje                                       |                                       |                               | Km/Km <sup>2</sup> | 1.31              |
|                                                | Pendiente media del río principal                         |                                       |                               | (%)                | 3.92              |
|                                                | Altura máxima del cauce                                   |                                       |                               | m.s.n.m.           | 4450              |
|                                                | Altitud mínima del cauce                                  |                                       |                               | m.s.n.m.           | 2500              |
|                                                | Tiempo de concentración                                   |                                       |                               | Hr.                | 5.76              |

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 Parámetros hidrológicos

#### 3.1.3.1 Precipitación

La precipitación promedio anual de la cuenca de Yucaes utilizando el método del Polígono de Thiessen se obtuvo 660.06 mm (cuadro 8.15 del anexo 8.5).

#### 3.1.3.2 Curvas I-D-F

- El tiempo de concentración se calculará con el método de Kirpich:

$$T_c = 0.01947 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

$$L = 59631.22 \text{ m}$$

$$H = 1950.00 \text{ m}$$

$$T_c = 345.44 \text{ min}$$

- La intensidad de la lluvia (en mm/hr) para diferentes periodos de retorno T (en años) y la duración t (en minutos).

Fórmula IILA Modificada:

$$i_{(T,TR)} = a(T + b)^{c-1} (1 + k \log T_R)$$

$$a = 12.10 \text{ mm}, b = 0.40 \text{ hr}, c = 0.242 \text{ adim}, k = 0.553 \text{ adim}$$

Los resultados de la intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno se obtuvieron del cuadro 8.16 del anexo 8.5. Así mismo el resumen de los parámetros estadísticos de Talbot se presenta en el cuadro 8.21 del anexo 8.5.

Por lo tanto el cálculo de la intensidad máxima ajustada se presenta en el cuadro 8.22 del anexo 8.5, para diferentes periodos de retorno T (en años) y la duración t (en minutos), permitiendo construir la curva I-D-F (gráfico 8.4, anexo 8.5).

A través de la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F), para un periodo de duración de 345.44 min, para un periodo de retorno T = 50 años la intensidad máxima es **5.80 mm/hr**.

A través de la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F) se obtienen los caudales máximos siguientes:

### 3.1.3.3 Caudal máximo

#### 3.1.3.3.1 Método Racional Modificado

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.278 * C * I * A * K$$

$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14}$$

C = 0.56 adim., para la región de Ayacucho.

I = 5.80 mm/hr

Ac = 692.80 km<sup>2</sup>

A<sub>30%</sub> = 207.84 km<sup>2</sup>

Tc = 5.76 hr

K = 1.39 adim.

Qmáx = 260.70 m<sup>3</sup>/s

#### 3.1.3.3.2 Método de Mac Math

$$Q = 0.0091 * C * I * A^{\frac{4}{5}} * S^{\frac{1}{5}}$$

C = 0.42

I = 5.80 mm/hr

Ac = 692.80 km<sup>2</sup>

S = 3.27 %

Qmáx. = 209.47 m<sup>3</sup>/s

#### 3.1.3.3.3 Método de Iszkowski

$$Q_{m\acute{a}x} = m * C * A * p * 10^{-3}$$

m= 4.82 adim.

Ac = 692.80 km<sup>2</sup>

p= 660.06 mm/año

Qmáx. = 264.49 m<sup>3</sup>/s

El caudal máximo promedio es **244.89 m<sup>3</sup>/s**.

### 3.2 Modelación de la erosión hídrica con el método USLE

#### 3.2.1 Determinar los factores del método de USLE

##### 3.2.1.1 Estimación o determinación del factor R (erosividad de la lluvia)

El factor de erosividad "R" se calculó con los registros hidrometeorológicos de la zona, para su análisis se trabajó con los métodos de Cortés, Lombardi y Fournier, y se ha relacionado con los índices de tolerancia internacional recomendado por la FAO, se encuentra en el cuadro 1.6 clasificación de rangos típicos de R anual.

##### a. Método propuesto por Cortés

$$R = Y = 2.4619 * P + 0.00606 * P^2$$

$$P = 660.06 \text{ mm}$$

$$R = 4265.18 \text{ M.J. *mm/ (ha*h)}$$

##### b. Método propuesto por Lombardi Neto

$$R = 67.355 * \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.85}$$

$$R = 4225.82 \text{ M.J. *mm/ (ha*h)}$$

##### c. Método propuesto por Fournier

$$125.59 * \sum \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.603}$$

$$R = 4153.99 \text{ M.J. *mm/ (ha*h)}$$

El promedio del factor de erosividad  $R_{\text{promedio}}$  es **4215.00 MJ\*mm/ (ha\*h)**, todos estos valores del factor "R" se encuentra en el anexo 8.6

##### 3.2.1.2 Estimación del factor K (erodabilidad del suelo)

Primero utilizaremos los datos de los parámetros agrológicos considerados del cuadro 3.1 tipo de suelos y sus respectivas áreas de la cuenca de Yucaes y del cuadro 3.2 características generales de suelos de la cuenca Yucaes, para determinar el factor de erodabilidad "K" se utilizará el Nomograma de Wischmeier y Smith, que se encuentra en el gráfico 8.5 del anexo 8.6.

Del gráfico 8.5, anexo 8.6 se obtiene los valores del factor K para cada tipo de suelo de la cuenca en estudio y el valor promedio de dicho factor, se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.5 El factor K según el tipo de suelo de la cuenca de Yucaes

| Características      | Área km <sup>2</sup> | K      | K <sub>Promedio</sub> |
|----------------------|----------------------|--------|-----------------------|
| Vitric Andosols (Tv) | 368.96               | 0.0202 | 7.453                 |
| Lithosols (l)        | 323.84               | 0.0102 | 3.303                 |
|                      | 692.80               |        | 0.016                 |

Fuente: Elaboración propia

Obteniéndose  $K_{\text{Promedio}} = 0.016 \text{ Ton*ha*h/ha*MJ*mm}$ .

### 3.2.1.3 Estimación del factor LS (topográfico)

El factor de grado y longitud de la pendiente "LS" se determinó a través de los parámetros geomorfológicos de la cuenca en estudio como la pendiente del curso del río y longitud del cauce principal.

$$L.S. = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.5} [0.065 + 0.0454 * S + 0.00065 * S^2]^1$$

$$\lambda = 54550.00 \text{ m}$$

$$S = 3.48 \%$$

$$L.S. = 5.255$$

Obteniéndose el factor  $LS_{\text{Promedio}} = 5.255$ .

### 3.2.1.4 Estimación del factor vegetación C

Para determinar el factor de cobertura "C" se ha considerado los datos de la tabla 1.2 valores de C para diferentes cultivos y la tabla 1.3 firmas espectrales de los polígonos de uso de suelo y valores correspondientes del factor C, y el resultado para la cuenca en estudio se muestra en el cuadro 8.32 del anexo 8.6.

Obteniéndose el factor  $C = 0.24$ .

### 3.2.1.5 Estimación del factor P (prácticas mecánicas)

Para determinar el factor de prácticas mecánicas "P" se ha considerado los datos del cuadro 8.33 anexo 8.6.

Obteniéndose el factor **P = 0.84**.

### 3.2.2 Estimación de la erosión potencial "Ap"

$$A_p = R * K * LS$$

$$R_{Promedio} = 4215.00 \text{ MJ*mm/ (Ha*h)}$$

$$K_{Promedio} = 0.016 \text{ Ton*ha*h/ha*MJ*mm}$$

$$LS_{promedio} = 5.255$$

$$A_p = 354.40 \text{ Ton/ha*año (Muy Alta la erosión)}$$

### 3.2.3 Estimación de la erosión actual "Aa"

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

$$R_{Promedio} = 4215.00 \text{ MJ*mm/ (Ha*h)}$$

$$K_{Promedio} = 0.016 \text{ Ton*ha*h/ha*MJ*mm}$$

$$LS_{promedio} = 5.255$$

$$C = 0.24$$

$$P = 0.84$$

$$A_a = 71.45 \text{ ton/ha*año (considerada de muy alta la erosión)}$$

Las medidas de prevención para el control de la erosión del suelo de la cuenca de Yucaes se determinaron con el mapa temático de pendientes (lámina 06 - anexo 8.9) y con el modelo empírico USLE (mapa temático de erosión actual de la cuenca de Yucaes, (lámina 11 - anexo 8.9)

Primeramente con el software ArcGis y el método de Klingebiel y Montgomery, se clasificaron las pendientes con sus respectivas áreas de la cuenca en estudio como se observa en el cuadro 3.6 y se identificaron las medidas de prevención para el control de erosión del suelo de acuerdo al rango de la pendiente como se observa en el cuadro 3.7, de igual manera con el modelo USLE se identificó de acuerdo al rango de la clasificación de la erosión actual (tabla 1.6).

Cuadro 3.6 Clasificación de pendientes

| Cuadro de clasificación de pendientes |                |                       |                 |                |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| Grado                                 | Porcentaje (%) | Descripción           | Superficie (Ha) | Porcentaje (%) |
| 0 - 2                                 | 0 - 3          | Plano                 | 7988.07         | 11.53          |
| 2 - 3                                 | 3 - 6          | Ligeramente ondulado  | 2339.88         | 3.38           |
| 3 - 7                                 | 6 - 12         | Ondulado              | 6581.23         | 9.50           |
| 7 - 14                                | 12 - 25        | Muy ondulado          | 17435.14        | 25.17          |
| 14 - 22                               | 25 - 40        | Ligeramente escarpado | 18969.71        | 27.38          |
| 22 - 31                               | 40 - 60        | Escarpado             | 12740.59        | 18.39          |
| 31 - 37                               | 60 - 75        | Muy escarpado         | 2448.11         | 3.53           |
| > 37                                  | > 75           | Montañoso             | 777.27          | 1.12           |
| <b>Total</b>                          |                |                       | <b>69280.00</b> | <b>100.00</b>  |

Fuente: Klingebiel y Montgomery (1962) y elaboración propia

Cuadro 3.7 Recomendación de obras de conservación y protección del suelo en la cuenca de Yucaes

| Rango de la erosión actual | Rango de pendiente (%) | Pérdida del suelo (Ton/ha/año) | Área afectada | % Área afectada | Medidas de prevención y control en la cuenca de Yucaes                                                                                                                                                                          | Características de su diseño                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Muy alto</b>            | > 60                   | > 200                          | 478.34        | 69.04           | Construcción de terrazas o andenes, en plataformas continua y escalonada en las laderas y superficies inclinadas, seguida de forestación y reforestación, con especies nativa como son, Cabuya o Maguey (Agave scabra).         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con fines técnicos, los andenes tendrán una longitud que oscilara entre 40 y 100 m, por un ancho que va desde 1,5 a 20 m, los muros de las terrazas tendrán 0,5 y 2 m de altura llegando ocasionalmente a 3 m, que tendrán tres estratos (piedras, grava y tierra agrícola), este último tendrá una capa de 0.7 m.</li> <li>- Forestación se realizara a un distanciamiento de 2.5 m, por encima de las terrazas.</li> </ul> |
| <b>Alto</b>                | 40 – 60                | 50 – 60                        | 118.26        | 17.07           | Construcción de canales de desviación, zanjaz de infiltración en lugares donde hay viviendas y terrenos agrícolas y canales de desviación en lugares donde existen obras e infraestructuras, terrenos de cultivos, y viviendas. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- El diseño del canal de desviación dependerá del caudal del agua acumulada de la zona, velocidad de escurrimiento, área de drenaje, la pendiente, rugosidad y forma del canal.</li> <li>- Para el diseño de zanjaz de infiltración capacidad de almacenamiento (l/ml)</li> </ul>                                                                                                                                              |
| <b>Medio</b>               | 25 – 40                | 10 – 50                        | 32.14         | 4.64            | Forestación y reforestación                                                                                                                                                                                                     | El sistema de plantación, será el                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                 |      |      |               |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------|------|------|---------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |      |      |               |               | utilizando planta y árboles nativos de la zona: Molle (Schinus molle), Cabuya o Maguey (Agave scabra), penca o tunal (Opuntia ficus-indica).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | sistema cuadrada debido a que en la zona se realizan actividades agrícolas, el distanciamiento entre plantas será de 2.5 m aproximadamente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Muy alto</b> | < 25 | < 10 | 64.06         | 9.25          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Defensas vivas naturales, en cauce y rivera del río Yucaes, en ambas márgenes del río.</li> <li>- Defensa viva forestal, se realice plantaciones de arbustos y árboles de raíces profundas, en sectores críticos como complemento a las estructuras o defensa artificial.</li> <li>- Gaviones, en cauces y riveras del río Yucaes, en zonas donde las poblaciones colindan con el cauce. (Muyurina, Yucaes, etc.)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Para la plantación de defensas vivas, se mantenga un ancho entre 30 - 40 m.</li> <li>- Para defensas vivas forestal, se mantenga un ancho entre 10 - 30 m.</li> <li>- Gaviones permanece siempre la relación altura/ancho 1:1; <math>\gamma_{\text{suelo}}=1800 \text{ kg/m}^3</math>; <math>\gamma_{\text{piedra}}= 2800 \text{ kg/me}</math>; <math>\sigma_{\text{suelo}}=2 \text{ kg/m}^2</math>; <math>\theta=30^\circ</math></li> </ul> |
| <b>Total</b>    |      |      | <b>692.80</b> | <b>100.00</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Fuente: Vásquez (2016) y Pastor (2009)

### 3.2.4 Producción de sedimentos

#### 3.2.4.1 Estimación de aporte de sedimentos

- Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente a través de la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo.

$$Y = 1.856 * (Q * I_{\text{máx}})^{0.56} * (A)^{0.12} * K * L * S * C * P_m$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

$$\text{Número de la curva } (N) = \frac{1000}{10 + S}$$

Despejando S:

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

$$S = 2.5 \text{ pulg.} * 25.4 = 63.50 \text{ mm}$$

$$Q = 589.53 \text{ mm}$$

$$I_{\text{máx}} = 5.80 \text{ mm/h (curvas I-D-F)}$$

$$A = 69280.00 \text{ ha}$$

$$K = 0.016 \text{ Ton*ha*h/ha*MJ*mm}$$

$$L.S = 5.255 \text{ Adim.}$$

$$C = 0.24 \text{ Adim.}$$

$$P = 0.84 \text{ Adim.}$$

$$Y = 11.42 \text{ t/ (ha*año)}$$

- El coeficiente de entrega de sedimentos, CES.

$$CES = 100 * \frac{AS}{ET}$$

Despejando AS obtenemos la siguiente fórmula:

$$AS = \frac{CES * ET}{100}$$

CES = 24 %, se obtiene del gráfico 1.3

$$ET = A_a$$

$$A_a = 71.45 \text{ t/ha*año.}$$

$$ET = 71.45 \text{ t/ha*año.}$$

$$AS = 17.15 \text{ t/ha*año}$$

- USBR propone un criterio para evaluar el aporte de sedimentos (AS)

$$AS = 1421.8 * (A_c)^{-0.229}$$

$$A_c = 692.80 \text{ km}^2$$

$$AS = 317.93 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$$

$$AS = 8.43 \text{ t/ (ha*año)}$$

La estimación de aporte de sedimentos promedio es **12.33 t/ (ha\*año)**.

### 3.2.4.2 Cálculo de la capacidad de transporte de una corriente

La ecuación de Mizuyama y Shimohigashi (1985) se puede expresar:

$$C = \frac{Q_s}{Q}$$

Despejando,  $Q_s$

$$Q_s = Q * C$$

$$C = \frac{20}{\left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right) - 1 \right]^2} * S^2$$

$$\left( \frac{\rho_s}{\rho} \right) = 2.65$$

$$C = 7.35 * S^2$$

$$C = 0.01176$$

$$Q_s = 2.88 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.3 Determinación de los diseños de las prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas en la cuenca de Yucaes

Se realizaron los diseños correspondientes:

#### 3.3.1 Diseño del andén

Para el establecimiento de un sistema de andenes se ha tenido en cuenta lo siguiente: la pendiente de la ladera debe estar comprendida entre 4 y 60 % preferentemente por razones de costo, la disponibilidad y caudal de las fuentes de agua para riego (manantiales, ríos, lagunas, lluvias, etc. Para andenes con fines de producción agrícola), la precipitación estacional anual en zonas de secano no debe ser menor a los 1200 mm, obtener y analizar los registros hidrológicos de la máxima precipitación y máxima avenida para el cálculo de caudales máximos y problemas de erosiones, estudio geológico y edafológico de la zona para la descripción del perfil de la ladera. Estabilidad del andén (figura 3.1).

### Estabilidad del andén

Se ha considerado una ladera con los siguientes datos:

$$S = 9 \%$$

$P = 660.06 \text{ mm/año}$ , la precipitación de la cuenca menor a  $1200 \text{ mm/año}$

$H: 1.50 \text{ m}$

$A_a = 16.94 \text{ m}$ , ancho del andén o espaciamiento del andén, tabla 1.8 ( $A = D + C + Y$ )

Cálculos de diseño:

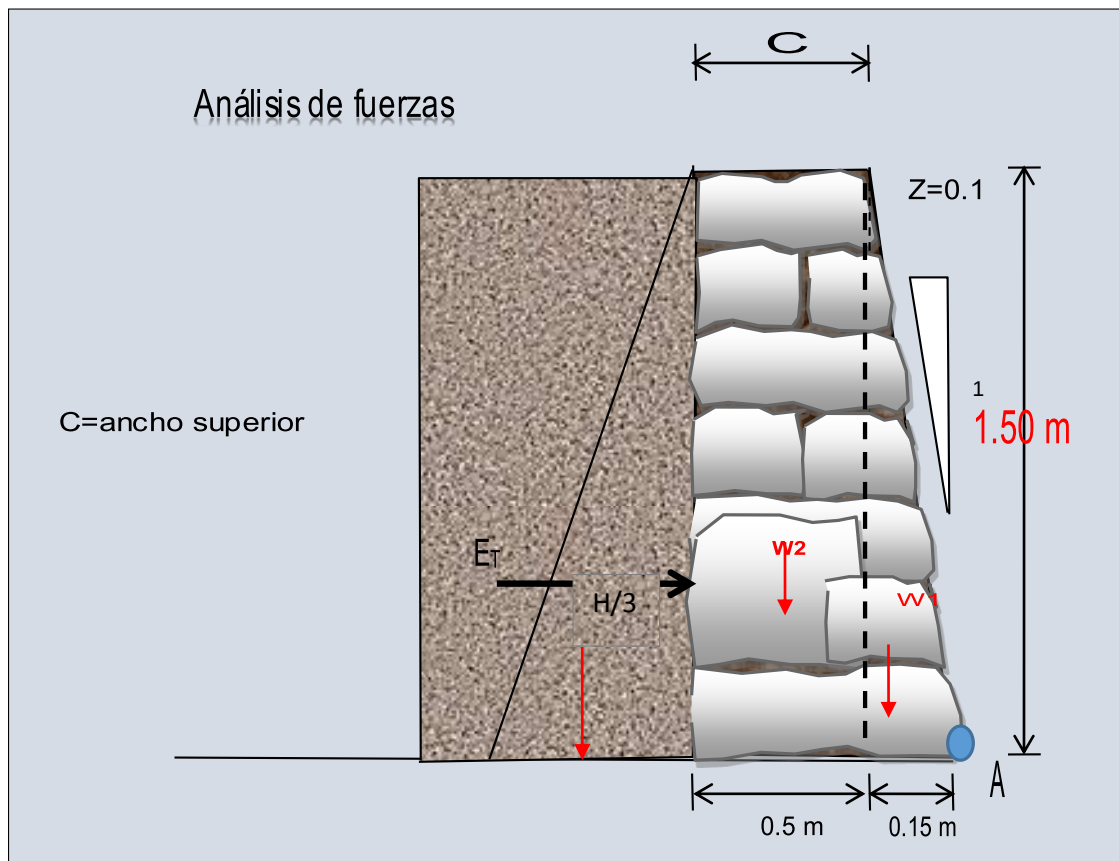


Figura 3.1 Análisis de fuerzas

Fuente: Elaboración propia

Por geometría del triángulo, se tiene:

$$\frac{1.5}{1} = \frac{x}{0.1}; \quad x = 0.15 \text{ m}$$

- Determinación de las cargas verticales,  $F_v$

$$W = \gamma * Vol. = \gamma * A * 1 \text{ m}$$

Cuadro 3.8 Cargas verticales

| Nº             | Peso específico<br>( $\gamma$ )<br>(ton./m <sup>3</sup> ) | Volumen<br>(m <sup>3</sup> )<br>(V) | Cargas<br>(ton./ml)<br>$F_v$ | Brazo<br>(m)   | Momento Resistente<br>(M <sub>r</sub> )(ton.-m/ml) |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------|----------------------------------------------------|
| W <sub>1</sub> | 2.7                                                       | 0.15*1.5*1/2                        | 0.30375                      | 2/3*0.15=0.1   | 0.03038                                            |
| W <sub>2</sub> | 2.7                                                       | 0.5*1.5*1                           | 2.02500                      | 0.15+0.25=0.40 | 0.81                                               |
| $\Sigma$       |                                                           |                                     | W <sub>T</sub> = 2.3288      |                | 0.84038                                            |

Fuente: Elaboración propia

- Determinación de las fuerzas horizontales, E<sub>a</sub>. Cálculo del empuje activo, E<sub>a</sub>:

$$E_a = \frac{1}{2} * K_a * \gamma_s * H^2 * 1$$

$$K_a = 0.3073$$

$$\gamma_s = 1.6 \text{ t / m}^3$$

$$E_a = 0.55314 \frac{\text{ton.}}{\text{ml}}$$

- Verificación al deslizamiento, C.S.D

Se tiene la relación del coeficiente de seguridad al deslizamiento:

$$C.S.D = \frac{\sum F_v}{\sum F_H} * f \quad (f, \text{ se toma de tabla 3.1})$$

Tabla 3.1 Valores del coeficiente de fricción (hormigón sobre suelo húmedo)

| Apoyo   | F       |
|---------|---------|
| Roca    | 0.6-0.7 |
| Grava   | 0.5-0.6 |
| Arena   | 0.4-0.5 |
| Limo    | 0.3-0.4 |
| Arcilla | 0.2-0.3 |

Fuente: Sofwate de Bocatomas

De la tabla tomamos (f = 0.65) en roca

Sustituyendo sus valores:

$$C.S.D = \frac{W_T * f}{E_a} = \frac{2.3288 * 0.65}{0.55314} = 2.7365 \text{ (1.2 – 1.5) OK}$$

Determinación del momento de volteo,  $M_v$ :

Actúa a:

$$h = \frac{H}{3} = 0.50 \text{ m}$$

El momento que produce el volteo,  $M_v$ :

$$M_v = E_a * h = 0.27657 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{ml}}$$

#### - Verificación al volteo

Se tiene la relación del coeficiente de seguridad al volteo, C.S.V:

$$C.S.V = \frac{M_r}{M_v} = 3.0386 \text{ (1.5–3.0) ok.}$$

#### - Verificación al hundimiento

. Determinación del punto de aplicación de la fuerza resultante, respecto al punto “A”:

$$X_A = \frac{M_r - M_v}{F_r}$$

$$X_A = 0.2421$$

. Cálculo de la excentricidad, e:

$$e = \frac{B}{2} - X_A$$

$$e = 0.0829 \text{ m}$$

$$e < \frac{1}{6} * B \rightarrow 0.0829 < 0.1083 \text{ m}$$

. Factor de seguridad al hundimiento, F.S.H:

$$\sigma = \frac{\sum F_r}{B} * \left( 1 \pm \frac{6 * e}{B} \right)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sum F_r}{B} * \left( 1 + \frac{6 * e}{B} \right) = 0.63 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 - \text{ml}}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sum F_r}{B} * \left(1 - \frac{6 * e}{B}\right) = 0.08 \frac{kg}{cm^2 - ml}$$

Se analiza en función a la tabla 3.2 de valores de resistencia del suelo, lo que demuestra que los valores están por encima de lo determinado en el cálculo anterior.

Tabla 3.2 Valores de la resistencia del suelo

| Tipo de suelo                 | Resistencia (tn/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tierra suave                  | 1.4-4.0                          |
| Limo mojado                   | 10 - 20                          |
| Arcilla suave                 | 10 - 15                          |
| Arcilla dura                  | 20 - 25                          |
| Arcilla estrecha con arena    | 20 - 30                          |
| Arcilla estrecha con gravilla | 20                               |
| Arena mojada                  | 30                               |
| Arena gruesa                  | 40 - 50                          |
| Arena gruesa con gravilla     | 50 - 60                          |
| Roca suave                    | 70 – 100                         |
| Roca dura                     | 200 - 400                        |

Fuente: Sofwate de Bocatomas

### 3.3.2 Diseño de canales de desviación

Para el diseño del canal de desviación se propone un diseño típico para el proyecto, teniendo los siguientes datos:



- Cálculo del tiempo de concentración en el tramo AB ( $t_{AB}$ ): de la tabla 1.10 en función de la pendiente ( $S = 20\%$ ) y la vegetación (pastos) se obtiene una velocidad de escurrimiento para la ladera de:

$$\diamond V_E = 110 \text{ m/min}$$

Además, espaciamiento entre laderas ( $E_L$ ) es: 50 m.

$$\text{Por tanto: } t_{AB} = \frac{E_L}{V_E} = 0.4545 \text{ min}$$

- Cálculo del tiempo de concentración en el tramo BC ( $t_{BC}$ ) de la tabla 1.11, para suelos Franco Arcillosos se considera una velocidad de canal ( $V_C$ ) de:  $V_C = 0.85 \text{ m/s}$ .

Además, la longitud del tramo BC es:  $L_{BC} = 350 \text{ m}$ .

$$\text{Por tanto: } t_{BC} = \frac{L_{BC}}{V_C} = 6.86 \text{ min.}$$

- Determinación del tiempo de concentración en el punto de desagüe C.

$$t_C = t_{AB} + t_{BC} = 7.31 \text{ min.}$$

Cálculo del caudal de escorrentía en el tramo BC, empleando el método racional ( $Q_{BC}$ ):

$$Q_{BC} = \frac{C * I_{m\acute{a}x} * A}{360} \dots\dots\dots(i)$$

De la tabla 1.9, para suelos con vegetación ligera, pastos y semipermeable se tiene  $C = 0.45$ .

De la figura 3.2, la superficie a drenar es de 1.75 ha.

Además, del estudio hidrológico en las curvas I-D-F, para  $Tr = 10$  años y tiempo de concentración calculado, se obtiene  $I_{m\acute{a}x} = 23.40 \text{ mm/h}$ . (gráfico 8.4 del anexo 8.5).

Por tanto, reemplazando valores en (i):

$$Q_{BC} = 0.051 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Cálculo de la sección del canal en el tramo BC y el tirante de agua (y):

Por el principio de continuidad, se tiene:

$$A_{BC} = \frac{Q_{BC}}{V_C} = 0.060 \text{ m}^2$$

Para un canal de geometría trapezoidal se tiene:  $A_{BC} = by + Zy^2$

De la tabla 1.12, para  $Q < 0.100 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene:  $b = 0.30\text{m}$

De la tabla 1.13, para canales poco profundos y suelos arcillosos  $Z = 0.5:1$

Entonces:  $0.060 = 0.30*y + 0.5*y^2$ , solución:

Por lo tanto,  $y \cong .020 \text{ m}$

- Verificando los cálculos con la ecuación de Manning.

$$V_{BC} = \frac{1}{n} \times R_{BC}^{\frac{2}{3}} \times S_{BC}^{\frac{1}{2}}$$

De la tabla 1.14, se asume  $S = 4.5 \text{ ‰} = 0.0045$ , para suelos arcillosos.

Para canales de tierra  $n = 0.018$ .

Calculando el perímetro y el radio hidráulico:

$$Z = 1, P_{BC} = b + 2y\sqrt{1+Z^2} = 0.87 \text{ m.}$$

$$Z = 0.5, P_{BC} = b + 2y\sqrt{1+Z^2} = 0.75 \text{ m.}$$

$$R_{BC} = \frac{A_{BC}}{P_{BC}} = 0.08 \text{ m.}$$

Reemplazando valores en la ecuación de Manning.

$$V_{BC} = 0.69 \text{ m/s}$$

Se debe mencionar que la diferencia entre  $V_{BC}$  y  $V_C$  no difiere mucho, por lo que los cálculos son aceptados. Se observa las medidas en la figura 3.3.

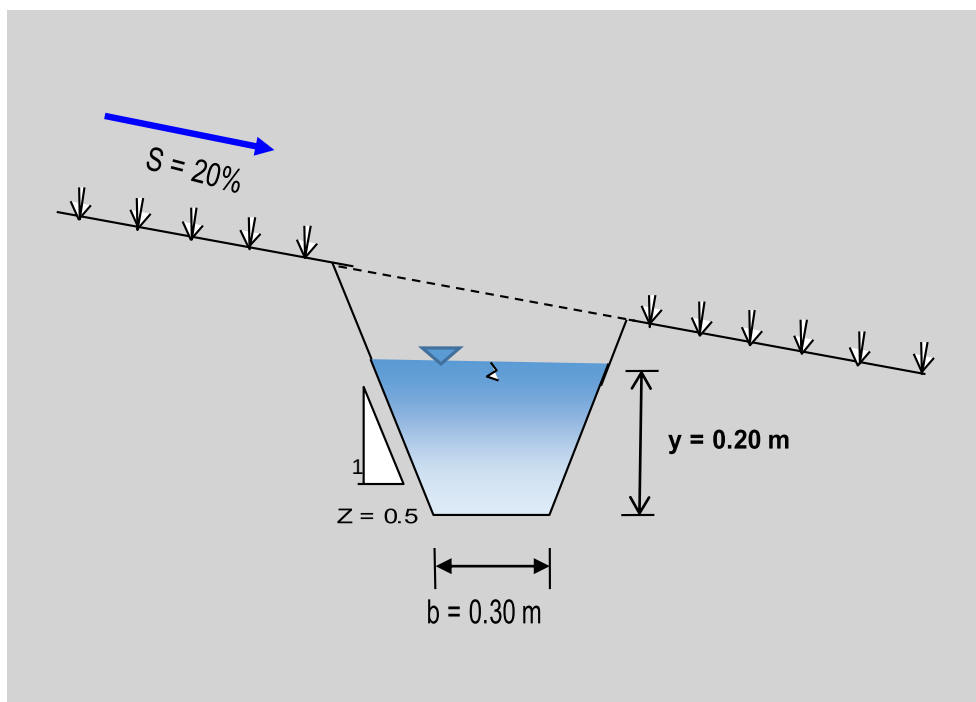


Figura 3.3 Sección transversal del canal de desviación tramo B - C

Fuente: Elaboración propia

- Cálculo del tiempo de concentración en el tramo  $T_{CD}$ , de la tabla 1.11, para suelos Franco Arcillosos se considera una velocidad de canal ( $V_C$ ) de:  $V_C = 0.85 \text{ m/s}$ . Además, la longitud del tramo BC es:  $L_{BC} = 350 \text{ m}$ .

Por tanto:  $t_{CD} = \frac{L_{BC}}{V_C} = 6.86 \text{ min.}$

- Determinación del tiempo de concentración en el punto de desagüe D:  
Luego, el tiempo de concentración en el punto D será,  $T_{CD}$ :

$$t_D = t_C + t_{CD} = 14.17 \text{ min.}$$

Cálculo del caudal de escorrentía en el tramo CD, empleando el método racional ( $Q_{CD}$ ):

$$Q_{CD} = \frac{C * I_{m\acute{a}x} * A}{360} \dots\dots\dots(i)$$

De la tabla 1.9, para suelos con vegetación ligera, pastos y semipermeable se tiene  $C = 0.45$ .

De la figura 3.2, la superficie a drenar es de 3.5 ha.

Además, del estudio hidrológico en las curvas I-D-F, para  $Tr = 10$  años y tiempo de concentración calculado se tiene  $I_{m\acute{a}x} = 22.00$  mm/h. (gráfico 8.4, anexo 8.5)

Por tanto, reemplazando valores en (i):

$$Q_{BC} = 0.096 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- Cálculo de la sección del canal en el tramo BC y el tirante de agua (y):

Por el principio de continuidad, se tiene:

$$A_{BC} = \frac{Q_{BC}}{V_C} = 0.113 \text{ m}^2$$

Para un canal de geometría trapezoidal se tiene:  $A_{BC} = by + Zy^2$

De la tabla 1.12, para  $Q < 0.113 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene:  $b = 0.40 \text{ m}$

De la tabla 1.13, para canales profundos y suelos arcillosos  $Z = 0.5:1$

Entonces:  **$0.113 = 0.40*y + 0.5*y^2$** , solución:

Por lo tanto,  **$y \cong .0.25 \text{ m}$**

- Verificando los cálculos con la ecuación de Manning.

$$V_{CD} = \frac{1}{n} \times R_{CD}^{\frac{2}{3}} \times S_{CD}^{\frac{1}{2}}$$

De la tabla 1.14, se asume  $S = 4.5 \text{ ‰} = 0.0045$ , para suelos arcillosos.

Para canales de tierra  $n = 0.018$ .

Calculando el perímetro y el radio hidráulico:

$$Z = 0.5, \quad P_{CD} = b + 2y * \sqrt{1 + Z^2} = 0.959 \text{ m}$$

$$R_{CD} = \frac{A_{CD}}{P_{CD}} = 0.12 \text{ m}.$$

Reemplazando valores en la ecuación de Manning.

$$V_{CD} = 0.91 \text{ m/s}$$

Se debe mencionar que la diferencia entre  $V_{CD}$  y  $V_C = 0.85 \text{ m/s}$ . no difiere mucho, por lo que los cálculos son aceptados. En la figura 3.4 se indican las medidas.

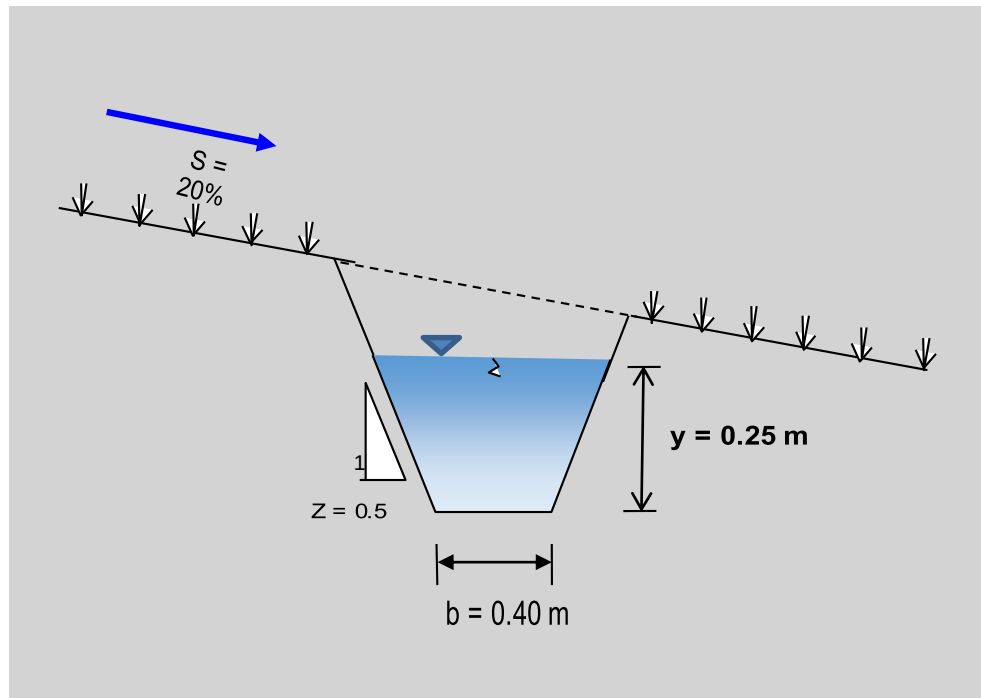


Figura 3.4 Sección transversal del canal de desviación. Tramo C - D

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Diseño de zanjas de infiltración

Para el diseño de la Zanja de Infiltración se utilizará la siguiente ecuación:

$$A = E * C * I_{m\acute{a}x} * 10 \dots\dots\dots (a)$$

Dónde:

A : Capacidad de Almacenamiento (l/ml)

E : Espaciamiento de una zanja a otra (IH) en m.

C : Coeficiente de escorrentía.

$I_{m\acute{a}x}$  : Intensidad máxima de precipitación (cm/día).

10 : factor de corrección.

Para el uso de la fórmula anterior se hará uso de las siguientes tablas.

Utilizando las tablas 1.8 y 1.15, encontramos los valores de “E” y “C” de la ecuación (a).

Del estudio de la prueba de textura del suelo, se determinó que el tipo de suelo es Franco Arcilloso el cual es de textura franco arcilloso en ladera. Anexo 8.8 prueba de infiltración.

La zona localizada para la prueba del proyecto, es una zona de pastizales que tiene una topografía en ladera y con una pendiente de 18% (usamos 20% en la tabla 1.16 por ser próximo), por lo que:

De la tabla 1.8  $E = IH = 13.56m$  y  $IV = 2.44m$ ;  $S = 18\%$

De la tabla 1.15  $C = 0.42$  (Textura franco arcilloso).

El diseño de la zanja de infiltración lo calculamos para un periodo de retorno de 5 años y para una precipitación máxima conservadora de 5.76 horas, entonces, de las curvas I-D-F (gráfico 8.4 – anexo 8.5), tenemos:

$T_C = 345.44 \text{ min.}$

$I_{\text{máx}} = 4.10 \text{ mm/h} = 9.84 \text{ cm/día.}$

$Tr = 5 \text{ años.}$

Reemplazando valores en (a):

$A = 560.41 \text{ l/ml.}$

Haciendo uso de la tabla 1.16, tenemos:

$H = 45.00 \text{ cm}$

$B = 91.00 \text{ cm}$

$H_2 = 45.50 \text{ cm}$

$Y_2 = 60.00 \text{ cm}$

$L = 10.00 \text{ m}$  (largo de zanja, criterio)

Espaciamiento de una zanja a otra:  $E = 13.56m$

La geometría de la zanja de infiltración generalmente depende de la textura del suelo, por lo que, para este diseño será de forma trapezoidal, ya que el suelo de la prueba de infiltración es de material (Franco arcilloso).

Presenta una sección trapezoidal con una pendiente lateral del talud aguas abajo de 1: z, donde  $z = 0,5$  a  $0,7$  y una pendiente lateral del talud aguas arriba de 1: z, donde  $z = 0,8$  a  $1$ .

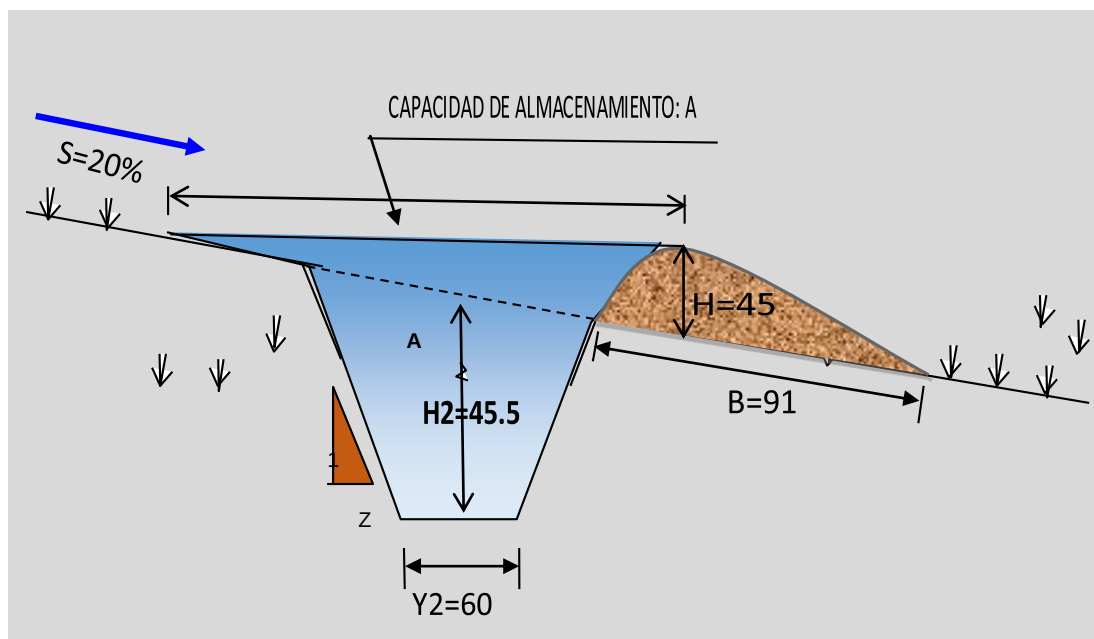


Figura 3.5 Dimensionamiento de la zanja de infiltración

Fuente: Elaboración propia

### Dimensionamiento de zanjas de infiltración

El distanciamiento a través de la pendiente entre las zanjas se calcula de acuerdo a la precipitación de diseño, lo que puede variar según la inclinación del terreno. El largo fluctúa entre 3 a 6 metros y la separación o tabique entre zanjas en la curva de nivel, varía entre 0,7 y 1,5 metros, según la altura de ellas (Pizarro, 2003).

Aguas abajo de la obra, se deberá construir un camellón de similar altura que la zanja y con un ancho equivalente a la anchura superior de la obra.

Adicionalmente, es posible incorporar algunas plantaciones en los espacios intermedios entre zanjas, con el propósito de disminuir la escorrentía del agua y el proceso erosivo.

Por otro lado, es importante enfatizar que la mantención de las zanjas es imprescindible para aumentar su vida útil; esta mantención se refiere a la limpieza del material arrastrado por el agua, el mantenimiento generalmente se puede realizar en los meses de lluvia al menos una vez por mes.

La determinación de otros parámetros como la velocidad de infiltración de los suelos, realizados paralelamente en el presente estudio, permitirá mejorar el diseño de zanjas de infiltración que corresponda a la cantidad de agua de lluvia que cae en la zona de captación, la cual debe ser menor o igual a la que capta y absorbe la zanja de

infiltración, y asimismo; un distanciamiento que permita un adecuado control de la erosión en la zona.

### 3.3.4 Diseño de muros de contención

El diseño del muro de contención se basa principalmente en un muro tipo pirca (terrazza) ya que el principio de este estudio es emplear materiales del lugar en el proceso constructivo de las estructuras planteadas.

Los muros en piedra son estructuras construidas con bloques o cantos grandes de roca, los cuales se colocan unos sobre otros en forma manual o al volteo. El tamaño de los bloques utilizados generalmente supera las 3 pulgadas y pueden utilizarse bloques hasta de 1 metro de diámetro si se tiene equipo adecuado para su colocación.

Para el diseño del muro de contención tipo pirca se determinará los siguientes parámetros:

$$S = 2\% \text{ a } 60\%$$

$$Z = 0.05:1 \text{ y } 0.15:1$$

$$H = 0.5 \text{ a } 3.0 \text{ m}$$

$$B = 0.34H \text{ a } 0.45H \text{ (m)} \quad (i)$$

$$C = 0.20m \text{ a } 0.40m$$

$$c = 0.30H \text{ a } 0.35H \text{ (m)} \quad (ii)$$

$$H = (a + C + y) \tan \theta \quad (iii)$$

$$y = Z \times H \quad (iv)$$

El diseño consiste en determinar las dimensiones exteriores del terraplén, se muestra en el cuadro 1.11.

### 3.3.5 Diseño de cárcavas

Se plantea el enfoque de un diseño típico de cómo aplicar a las condiciones de éste problema, pues cada caso tendrá una solución específica.

Con la información recogida consideramos una parcela con pendiente mayor de 6 % y un suelo de textura franco arcillosa obtenida de la prueba de infiltración en la cuenca de Yucaes. A lo largo de una cárcava se ha localizado el lugar favorable donde se va a enclavar o establecer un pequeño dique de retención. En dicho punto la cárcava tiene

un área de drenaje de 2.5 ha, una longitud aproximada de 200 m y una pendiente del 10 %. La sección transversal correspondiente tiene una profundidad de 1.15 m y una anchura superior e inferior de 1.10 y 0.30 m respectivamente, se determinó:

#### **a. El espaciamiento**

Se prevé que la altura del dique sea de 0.7 m y con este valor y la pendiente conocida de 10% y con la tabla de doble entrada pendiente – altura del dique se busca el valor correspondiente a los parámetros obteniéndose la separación o distanciamiento entre diques de 23 m (aproximadamente 8 pequeños diques divididos en los 200 m de longitud).

#### **b. Cálculo de la anchura de coronación del dique, $A_p$**

De la expresión o fórmula:

$$A_p = A_{fc} + \left( \frac{H_{máx.} * (A_{sc} - A_{fc})}{P_c} \right)$$

Datos:

$A_{fc} = 0.30$  m, es la anchura de la cárcava en su fondo ( $f_c$  : fondo de cárcava)

$A_{sc} = 1.10$  m, es la anchura de cárcava en el punto más alto de la sección donde se construye el dique ( $sc$ : punto más alto donde se construye el dique de la sección de la cárcava)

$H_{máx.} = 1.00$  m (es la altura efectiva del dique, medida desde la altura máxima de agua en la coronación del aliviadero)

$P_c = 1.15$  m (profundidad total de la cárcava)

Sustituyendo los valores en la ecuación, se tiene:

$$A_p = 0.99 \text{ m}$$

#### **c. Cálculo de la longitud del dissipador de energía, $L_d$**

Siendo la condición entre 1.5 y 2 veces la altura del dique. En consecuencia:

$$L_d = 1.75 * 1 = 1.75 \cong 1.8 \text{ m aproximadamente}$$

#### **d. Determinación de las dimensiones del aliviadero**

##### **d.1 Requerimos conocer la determinación del caudal de diseño, Q**

Se aplica la ecuación del método racional, estableciendo como periodo de retorno de dicho caudal,  $T_r = 25$  años

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

Datos:

C = es el coeficiente de escorrentía (suelo tipo C – tabla 1.18) = 0.48

La determinación de la lluvia de diseño requiere el cálculo del tiempo de concentración,  $T_c$ , del área de aporte en el punto de actuación que determina la duración de la tormenta más desfavorable. Según la fórmula de Kirpich:

$$T_c = 0.0195 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Sustituyendo los datos, se tiene:

$$T_c = 0.0195 * (200)^{0.77} * (0.10)^{-0.385} = 2.80 \text{ min}$$

Para el cálculo de la intensidad de la lluvia para un periodo de retorno de 25 años y una duración igual al tiempo de concentración de 2.8 minutos, se busca el valor correspondiente en la curva I-D-F (gráfico 8.4, anexo 8.5), obteniéndose la intensidad máxima de 27.5 mm/h.

Finalmente, con éste dato se puede abordar el cálculo del caudal punta para 25 años de periodo de retorno, mediante la expresión del método racional:

$$Q = \frac{0.48 * 27.5 * 0.025}{3.6} = 0.092 \text{ m}^3 / \text{s} \cong 0.10 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Entrando en la tabla de la página con el caudal obtenido, se procede a dimensionar el aliviadero, resultando:

- . Anchura del aliviadero= 0.60 m
- . Altura de agua sobre el vertedero= 0.30 m

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIONES

#### 4.1 Análisis de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos

##### 4.1.1 Análisis de los parámetros agrológicos

Se ha procedido para el cálculo del factor de erosibilidad del suelo  $k$ , utilizar el nomograma de Wischmeier y Smith con respecto a la fórmula matemática y uso de tablas, así elegir y emplear para su cálculo los parámetros agrológicos como: porcentaje de limo, arena, materia orgánica, estructura granular y permeabilidad del suelo, obteniéndose un valor promedio de 0.016.

##### 4.1.2 Análisis de los parámetros geomorfológicos

La zona se caracteriza por tener un régimen irregular de precipitación estacional concentradas en muy pocos meses año de diciembre a marzo, diferente permeabilidad de los materiales y una zona de morfología de fuerte pendiente y en algunos casos abrupta en estas predominan cárcavas y barrancos.

La interpretación de los parámetros geomorfológicos en estudio para el presente trabajo de investigación son los siguientes: el **área** obtenida a través del software ArcGis arrojó 692.80 km<sup>2</sup> que es considerada por los expertos como un área de intermedia a grande. De igual manera el **perímetro** es de 155.36 km y **la longitud del cauce principal** desde el punto de aforo hasta el punto más alto de la divisoria de la cuenca en estudio es de 59.63 km y obtenida a través del software mencionado. La **curva hipsométrica** es de una cuenca madura, la que nos permitiría determinar la hidrología de la región; los pisos ecológicos donde se desarrollan óptimamente los

cultivos, áreas deforestadas etc. así como al analizar el estudio de la cuenca de Yucaes a través del mapa de pendiente identificamos los problemas de erosión del suelo y el tratamiento respectivo para su conservación del suelo y el agua. El **coeficiente de compacidad**  $K_c = 1.66$ , que corresponde a la forma de la cuenca oblonga en el rango de  $1.50 - 1.75$ , Vásquez (2000). La **densidad de drenaje**  $D_d$ , se ha obtenido ( $D_d = 1.31 \text{ km/km}^2$ ), este parámetro indica que las precipitaciones influirán inmediatamente sobre las descargas en el río de Yucaes (tiempos de concentración cortos), produciéndose fuerte erosión del suelo y mayor cantidad de transporte de sedimentos además indica que el relieve es accidentado.

Estas características se traducen en la concentración de los recursos en un número escaso de avenidas con elevados caudales y velocidades y una gran proporción de transporte de materiales sólidos. La relación de elongación o alargamiento está muy relacionada al relieve de la cuenca de Yucaes, así tenemos una elongación de 0.49, se dice que está relacionado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno. Considerando que no es nuestro caso la de tener la relación de elongación valores cercanos a la unidad donde son típicos de regiones con relieve suave o bajo.

Por tanto de una topografía de mayor accidentalidad o pendiente, menor tiempo de concentración  $t_c$ . Y de la forma de la cuenca de Yucaes que tiene la forma oblonga, hacen que se presenten menores  $t_c$  y una mayor tendencia a la creciente y a la erodabilidad de los suelos si es que no se encuentran protegidos con la cobertura vegetal y las prácticas de conservación. La **pendiente del cauce principal** se determinó aproximadamente 3.92 %, que nos permite analizar las características hidráulicas del escurrimiento, la capacidad de transporte aproximado  $Q_s = 2.88 \text{ m}^3/\text{s}$ , la duración del tiempo de concentración  $t_c = 5.76$  horas para la determinación del caudal máximo. La **pendiente de la cuenca** de Yucaes fue de aproximadamente 2.89 %, que nos permite conocer la relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea a los cauces, conforme aumenta ésta aumenta la velocidad de escurrimiento, creciendo las magnitudes de las avenidas, la erosión y la contribución de sedimentos como los obtenidos en el estudio de aproximadamente  $Q_s = 12.33 \text{ t/ (ha}\cdot\text{año)}$ .

### **4.1.3 Análisis de los parámetros hidrológicos**

#### **4.1.3.1 Análisis de la precipitación**

Se ha realizado a través del polígono de Thiesen

#### **4.1.3.2 Análisis de las curvas I-D-F**

Se analiza con:

##### **Intensidad de lluvia**

Es el factor primordial y principal del fenómeno de la erosión, cuando la velocidad de penetración del agua en el suelo es insuficiente, debido a que ésta podría caer con gran intensidad en un período de tiempo relativamente corto produciendo escorrentía. No es entonces tan importante el total de la lluvia como la intensidad de la lluvia.

Así conforme lo describe Horton (1945), la relación existente entre la intensidad de la lluvia y la rapidez de infiltración del suelo, estaría dado como:

De su análisis los valores de intensidad rara vez superan 75, en el caso de tormentas estivales.

Por tanto deduce, si la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración igualará la capacidad de infiltración y el excedente de la precipitación formará escurrimiento superficial y a viceversa.

##### **Frecuencia de la lluvia**

La respuesta del suelo en términos de erosión puede estar anexado a los eventos de la lluvia Morgan (1997) dos eventos de lluvia que se sucedan sin haberse alcanzado a secar el suelo puede llegar a que la segunda lluvia no se infiltre, o lo haga mínimamente y gran parte de ella escurra. A pesar de muchos estudios, sin embargo la teoría más aceptada Morgan (1997) es aquella que señala la asociación de la mayor parte de la erosión con eventos y frecuencia y magnitud moderada, dado que los eventos extremos son menos frecuentes para contribuir de manera apreciable en las cantidades de suelo erosionado por un largo periodo de tiempo.

#### **4.1.3.3 Análisis del caudal máximo**

Los tres métodos empleados en el trabajo de investigación como el método racional modificado, Mac Math y el de Iszkowski sus resultados quedan dentro de los rangos aceptables no diferenciándose mucho el uno del otro.

#### **4.2 Análisis de la estimación de la pérdida de suelo con la USLE**

La pérdida de suelo que se produce en una cuenca no puede ser calculada con exactitud solo estimada, así de los resultados y con una precipitación promedio de 660.06 mm/año se tiene una erosión potencial de 354.40 ton/ha\*año considerada como de muy alta la erosión y una erosión actual de 71.45 ton/ha\*año considerada como una erosión muy alta y persistente. Se corrobora los resultados obtenidos en parte con lo investigado por Vásquez y Tapia (2011), utilizando el método directo de clavos o varillas de erosión.

De conformidad a las directrices de la FAO, UNESCO Y PNUMA la erosión obtenida se encuentra en un nivel alto de degradación del suelo.

El análisis del mapa de pendiente según Klingebiel y Montgomery (1962) resultado de la clasificación de pendientes de la cuenca de Yucaes se tiene la superficie del terreno con pendientes desde plano a ondulado (pendiente de 0 – 12 %), un área de 24.41 %, de muy ondulado a escarpado (pendiente de 12 – 60 %) y un área de 70.94 % y desde muy escarpado a montañoso (pendiente > 60 %) con un área de 4.65 %. Concentrándose la mayor área en terrenos de muy ondulado a escarpado. Anexo 8.10 (lámina 06).

Los procesos y agentes pedogenéticos actúan en mayor intensidad, en función a la posición fisiografía, (topografía, clima, vegetación y tiempo), dando lugar a la meteorización química, (oxidación, hidratación, hidrólisis, carbonatación y disolución), desempeñando una función importante en la formación y evolución de los horizontes del suelo.

El problema principal de ésta zona es la fuerte erosión. La erosión, la cual destruye la capa superficial de la corteza terrestre o suelos. Esta es propiciada por el uso inadecuado de los recursos naturales y por las características del clima y del suelo. Los agentes activos de la erosión, como el agua, el viento, los animales y el hombre, destruyen la vegetación, arrastran la capa vegetal de los suelos, arena, y sedimentos,

originando paisajes semidesérticos y desérticos con grandes limitaciones para el establecimiento humano.

La erosión hídrica en el Perú y la cuenca de Yucaes ocasiona un sinnúmero de problemas, como pérdida de tierras para cultivo, pérdida de nutrientes en la tierra, acumulación de material hacia zonas urbanas, azolvamiento de cauces y embalses, así como pérdida de capacidad en obras hidráulicas, entre otros.

El terreno montañoso de la zona unido a la mala gestión ambiental (deforestación, malas prácticas agrícolas y uso irracional de la tierra) aumenta los riesgos a la erosión hídrica en la zona, los deslizamientos de tierra e intensifican el efecto de las sequías.

La agricultura de subsistencia que se desarrolla en laderas empinadas por agricultores pobres carentes de opciones económicas viables acarrea pérdidas de suelos excesivas y escorrentía de agua incontrolada a causa de las tormentas.

Entonces, es importante requerir que los beneficiarios de las cuencas bajas paguen por los servicios de las cuencas hidrográficas y dedicar fondos a ayudar a los agricultores de subsistencia y otros propietarios de tierras en las cuencas altas a que adopten prácticas más sostenibles de manejo de los recursos naturales, y proteger los ecosistemas de tierras altas, garantizando que las mujeres agricultoras se beneficien equitativamente de esos programas.

Para estimar la erosión de los suelos se ha utilizado el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) como método para el cálculo de las tasas de pérdida de suelo, que se utiliza para definir las prácticas y obras de conservación de suelos que permitan que la erosión actual sea menor o igual que la tasa máxima permisible de erosión.

Al respecto, es urgente la necesidad de establecer acciones de conservación de suelos en la cuenca de Yucaes donde se ha obtenido una erosión de 71.45 tn/ha-año, que significa erosiones aceleradas y con un indicador alto de degradación de los suelos.

CENICAFE (1975), reporta pérdidas anuales de suelos del orden de 119 tn/ha-año en pendientes de 23 % y de 327 tn/ha-año en condiciones de pendiente del 43 %.

Las pérdidas de suelo (PS) se comparan con la tasa de formación del suelo (TFS):

$PS > TFS$  Degradación,  $PS = TFS$  Equilibrio,  $PS < TFS$  Formación

Se ha considerado un promedio de varias fórmulas o modelos para estimar la pérdida de suelo de investigadores que nos dan mayor confiabilidad del cálculo efectuado.

La textura y estructura del suelo han sido usualmente consideradas las características físicas más importantes. La estructura condiciona en gran medida la velocidad y el tipo de movimiento vertical del agua en el perfil edáfico, así estructuras laminares propician movimientos de aguas muy lentos, en tanto que estructuras de tipo columnar favorecen el rápido tránsito de ella, aun cuando se tengan texturas arcillosas (Henao, 1988).

La textura por su parte condiciona la infiltración en los terrenos, así, las capacidades de infiltración pueden variar desde más de 200 mm.h<sup>-1</sup> para arenas hasta menos de 5 mm.h<sup>-1</sup> para arcillas (Withers y Vipond, 1974). Sin embargo, al irse inclinando el terreno, suelos sueltos y ligeros son más propensos a la separación o desplazamiento del lugar que ocupan por efecto del golpeteo y posteriormente de la gravedad.

En condiciones normales, sería de esperar que la erosión se incrementará conforme lo hicieran el grado y la longitud de la pendiente como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la escorrentía superficial Morgan (1997).

A su vez, el factor C de cubierta y manejo de la vegetación es obtenido a través de las tabulaciones que para estos efectos tiene USLE. Normalmente cuando se habilitan terrenos agrícolas, quedan completamente desnudos y desprotegidos absolutamente ante la lluvia, cuando no se pretende hacer práctica de control alguna en este caso se acercaría el factor C a 1. Para las condiciones del estudio de nuestra cuenca existen cultivos, vegetación arbustiva, forestación, algunas prácticas mecánicas, etc. Por lo que el factor C, tomaría el valor de 0.24. La relación de la Cobertura Vegetal del suelo y la erosión hídrica, para los resultados en las microcuencas evaluadas han determinado que ha existido una relación inversamente proporcional entre ambos. Es decir, cuanta menor cobertura del suelo existe en el campo mayor magnitud de erosión se pudo encontrar.

Se deberán realizar esfuerzos para regenerar y diseñar sistemas agroecológicos con alta capacidad de retención de agua, resistencia a enfermedades y plagas, retención y reciclado de nutrientes, alta biodiversidad y niveles estables de producción. Otra medida esencial para prevenir o contrarrestar el deterioro de los suelos, comprende el manejo de las tierras de cultivo con normas severas y ecológicamente sanas. Esto implica el uso de abonos orgánicos y la aplicación de sistemas de cultivo acordes con

las condiciones del sitio, como los cultivos mixtos, los sistemas agroforestales y la rotación de cultivos.

Es evidente, que la tala de árboles para leña (uso doméstico y hornos de la ciudad) está ocasionando un daño ambiental, por lo que sería importante fomentar una educación y cultura ambiental y realizar campañas de restitución permanente de árboles nativos propios de la región. El uso de las prácticas de conservación de suelos se utiliza para reducir las pérdidas de suelo hasta alcanzar las máximas permisibles.

Asimismo, el factor P tomaría el valor de aproximadamente 0.84, dado que existen algunas prácticas y se pretende con el estudio realizar prácticas de conservación del suelo y el agua.

La estimación de pérdidas de suelo, representa una importante herramienta a los efectos de la planificación del uso de la tierra, en el marco de la gestión ambiental.

#### **4.2.1 Análisis del transporte de sedimento**

En el estudio del transporte de sedimento la estimación de aporte de sedimentos en la cuenca de Yucaes fue de aproximadamente un promedio de 12.33 ton/ha\*año, empleando métodos indirectos como: MUSLE; USBR y Mizuyama & Shimohigashi. El transporte de sedimentos y el depósito excesivo de sedimentos en los cauces de los ríos y la degradación de las cuencas hidrográficas han aumentado la probabilidad de inundaciones, socavación de estructuras (puentes, defensas ribereñas, etc.) como resultado de tormentas mucho más pequeñas.

Para el análisis del aporte de sedimento se utilizó la curva número y su respectiva fórmula. El Soil Conservation Service (S.C.S.) observó que al momento de representar gráficamente la precipitación total y la parte de ésta correspondiente a precipitación efectiva se obtuvieron curvas. Para estandarizarlas se definió un número adimensional de curva, que se conoce como CN, de forma tal que  $0 < CN < 100$ . Para superficies impermeables y con espejos de agua CN vale 100; para superficies naturales  $CN < 100$  y para superficie sin escurrimiento CN vale cero. Los valores de CN han sido tabulados para diferentes tipos de suelo y de uso de la tierra (Chow, Maidment y Mays, 1994). El método nos ayuda a calcular la escorrentía en cuencas medianas y pequeñas a partir de datos de precipitación y otros parámetros.

### **4.3 Análisis de las prácticas mecánicas de conservación de suelos**

Para que las prácticas de control de erosión sean las más adecuadas deben tomarse en cuenta el tipo de área a estabilizar en la zona del estudio.

Es necesario en función al plano de pendientes se analiza que existe un mayor porcentaje de áreas con pendientes fuertes y un bajo porcentaje con pendientes suaves, por lo que sería muy afectado por la pérdida de suelos si no se toman las medidas de prevención y ejecución de obras de control y manejo de la cuenca.

Por tanto, deben las autoridades sensibilizar y proponer la construcción de canales recolectores o drenes para canalizar el agua de lluvias.

Se podrá aplicar en los canales de desviación y zanjas de infiltración vegetalizado, cuyo sistema consiste en la colocación de estacas vivas en los canales de desviación y zanjas de infiltración, las cuales actúan como anclaje y contribuyen ambientalmente a lograr un paisaje más agradable y resistente a la erosión (Suárez, 2001). La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo (López, 1999).

Vasquez (2011), de los resultados obtenidos muestran que la tasa promedio de erosión en las laderas de la sierra es de 45.04 ton/ha-año, que representa una pérdida de suelo de 3.20 mm/año. Asimismo, se encontró que la construcción de zanjas de infiltración, redujo la pérdida de suelo en 20.60 ton/ha-año lo que significa 1.47 mm/año.

#### **- Indicadores de gestión**

La observación de la adecuada eficiencia de las medidas de control de erosión se dan precisamente cuando estas se ponen a prueba por la precipitación y los procesos erosivos generados por ella (erosión laminar, en surcos, etc.). Para realizar un análisis previo a esto (antes que la época de lluvias se establezca), se puede observar la construcción de las estructuras de control de erosión, la adecuada instalación y el porcentaje de cobertura de la revegetación. En ambos momentos, se recomienda realizar listas de verificación para observar la adecuada implementación y aquellas recomendaciones que se requieren implementar de forma inmediata antes de poner en riesgo la integridad de las poblaciones aledañas.

Deben ponerse en práctica una serie de acciones que incluyen desde lo preventivo, en los casos en que la degradación no sea muy severa, hasta acciones de tipo correctivo.

Lo preventivo parte de una planificación adecuada del uso del suelo. En la medida en que se respeten los parámetros ecológicos, socioeconómicos y culturales que determinan el uso óptimo de un área, se garantiza la conservación y el rendimiento sostenido de la misma.

La reforestación juega un papel importante en la recuperación de las áreas degradadas. El sistema a seguir varía según las condiciones de la misma. El empleo de métodos como la irrigación, el drenaje, la desalinización y otros, es valioso en situaciones en que sea económicamente factible y ecológicamente aceptable.

En términos generales puede afirmarse que la recuperación de suelos es un problema bastante complejo que depende de una gran cantidad de factores. Cada caso particular debe enfocarse por sí mismo y analizarse en torno a su propia realidad circundante, de tal manera que las acciones son tan variables como las situaciones particulares.

- Cartografía de suelos y evaluación de tierras, planificación, diseño y construcción, prácticas agroconservacionistas, informática y banco de datos.

Se estima que esta estructura interna dará paso en lo futuro a departamentos técnicos especializados.

Estos resultados indican que el técnico tiene los instrumentos para seleccionar el tipo de cultivo y las prácticas de manejo del suelo y vegetación para conservar el suelo y reducir la erosión.

Este procedimiento se le conoce como la planeación del uso y manejo de los suelos con fines de conservación.

Seleccionar aquellas prácticas que reduzcan la erosión, hasta llegar a la práctica u obra que satisfaga a los productores.

- Es importante planificar estratégicamente los esfuerzos de restauración para que produzcan un efecto benéfico directamente en el desempeño de los sistemas agrícolas. Se requiere de un plan coordinado de restauración de la cuenca completa.

La alianza entre organismos de la sociedad civil y comunidades con instancias como SEMARNAT, CONANP y CONAFOR demuestran que se pueden establecer prácticas respetuosas y alejadas de objetivos partidarios.

### 4.3.1 Mejora del agua

Se puede realizar:

- A través de la implementación de obras de conservación de suelos y agua que tiendan a revertir el deterioro de los recursos naturales esto ligado con la participación activa de la población.

- Cosechas de agua, dada la urgencia de detener la erosión y capturar agua para la recarga de los acuíferos, a través de los diseños formulados de conservación de agua y suelo (canales de desviación, zanjales de infiltración, terrazas o andenes)

Las obras de captura y cosecha de agua deben ser planeadas y diseñadas para que el agua de lluvia se colecte y transfiera eficientemente a las áreas de cultivo y minimizar pérdidas por evaporación.

- Las decisiones sobre el manejo de las cuencas hidrográficas, deben estar orientadas hacia la definición de una estrategia integral en la que el aprovechamiento de un recurso minimice el deterioro de otros.

Por esta razón es importante planificar estratégicamente los esfuerzos de restauración y formular proyectos de manejo integral para que produzcan un efecto benéfico directamente en el desempeño de los sistemas agrícolas.

Se deberán realizar esfuerzos para regenerar y diseñar sistemas agroecológicos con alta capacidad de retención de agua, resistencia a enfermedades y plagas, retención y reciclado de nutrientes, alta biodiversidad y niveles estables de producción.

Es necesaria una Ordenación Integral de Cuencas Hidrográficas, a través de las prácticas agronómicas, mecánicas y agroforestales contribuyendo decisivamente a conciliar un uso racional y armónico la conservación del agua y el suelo.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones de la presente investigación, de los resultados obtenidos son los siguientes:

1. En la parte de los parámetros agrológicos para estimar el factor K utilizando el nomograma de Wischmeier y Smith en la cuenca de Yucaes, se procedió a determinar los parámetros del porcentaje de limo, arena, materia orgánica, estructura granular y permeabilidad del suelo. Asimismo se logró determinar los parámetros geomorfológicos (delimitación de la cuenca, pendiente, etc.) que ha servido de base para obtener los mapas temáticos y con los parámetros hidrológicos se ha estimado los caudales máximos, utilizando métodos empíricos como: el método racional modificado, método de Mac Math y el método de Iszkowski, obteniendo un caudal máximo promedio de (244.89 m<sup>3</sup>/s), que permitió el cálculo del aporte de sedimentos en el río Yucaes a través de métodos empíricos obteniéndose aproximadamente 12.33 T/ha-año, que es considerada como una alta pérdida de suelos por sedimentos que carga el río. También se determinó la capacidad de transporte de la corriente del río de aproximadamente 2.88 m<sup>3</sup>/s.
2. Se logró realizar la modelación de la erosión hídrica con el método USLE o ecuación universal de la pérdida de suelo (EUPS) lográndose una “ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA” en la cuenca hidrográfica de Yucaes, con el análisis de los factores: Factor R de erosividad de la lluvia, el factor K, de erodabilidad del suelo, factor LS (longitud de la pendiente y de inclinación de la pendiente), el factor C, de cultivos y vegetación y el factor P, de prácticas de conservación de suelos; obteniéndose aproximadamente una estimación de la erosión potencial de suelo de

354.40 Ton/ha\*año y de una tasa de erosión actual de suelo 71.45 Ton/ha\*año, considerando un riesgo de erosión laminar fuerte según propuesta de la FAO (1980), concentrándose en la parte media y baja de la cuenca.

Además ha permitido la detección de áreas críticas que deben ser estudiadas en mayor profundidad para implementar medidas de mitigación, teniendo en cuenta la clasificación de la FAO, se puede decir que un 52.08 % de la cuenca de estudio se encuentra en la clase de muy severa erosión, 21.21 % en erosión severa y en erosión catastrófica 9.61 %. La menor parte de la misma, 17.10 % presenta erosión de normal, ligera y moderada.

3. Finalmente, se concluyó con los diseños propuestos de prácticas de manejo y conservación de suelos y agua para el control de la erosión hídrica y el tratamiento de laderas consistente (canales de desviación, zanjias de infiltración, andenes y el control de cárcavas).

## RECOMENDACIONES

1. Es importante realizar una adecuada caracterización de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos si queremos optimizar la planificación y manejo de los recursos agua y suelo. Los parámetros geomorfológicos actúan de manera directa en el comportamiento hidrológico de la cuenca, y en la erosividad de la lluvia y los parámetros agrológicos en la erodabilidad del suelo.
2. En cuanto a la aplicación de RUSLE y contando con una base de datos adecuada a nuestra realidad, nos permitirían realizar futuras investigaciones con mayor grado de precisión en la pérdida de suelo.
3. La importancia de preservar la productividad del medio natural, haciendo prácticas de conservación del suelo y del agua con prácticas asociadas agronómicas, agroforestales y en nuestro caso se alcanzó el objetivo de presentar una propuesta de diseño de prácticas mecánico – estructurales como: canales de desviación, zanjas de infiltración, andenes y de cárcavas). Así mismo se recomienda continuar con las investigaciones con métodos directos (pruebas de infiltración, calicatas, etc) para la clasificación de suelos en la cuenca de Yucaes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBITRES, V. (2000). Método científico. Planificación de la investigación. Perú. Ed. Ciencia. 205 p.
2. BARAHONA, F. (2006). Caracterización paisajística y definición de lineamientos de manejo de Montaña Grande. Honduras.
3. BENAVIDES, M. (2004). Conservación y abandono de andenes. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. 220 pp.
4. BENITO, M. E. (1988). Iniciación al estudio de la estructura de los suelos de Galicia y de sus procesos de degradación. Tesis doctoral. Universidad de Santiago. Facultad de Farmacia. Santiago. 337 p.
5. BLOSSIERS, J. (1994). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Agricultura de laderas a través de andenes. TECNIDES. Perú.
6. BREA, J.D. y BALOCCHI, F. (2010). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas. PHI-VII / Documento Técnico N° 22. UNESCO. Volumen 1. 138 p.
7. BREÑA, A. y JACOBO, M. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
8. BROUWER, H. (1986). Intake ratye: Cylinder infiltrometer. USA, 825 – 843 p.
9. CABALLERO, L. (2014). “Estadística aplicada a la investigación científica con SPSS”. Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle” Área Académica de Investigación. Chosica – Perú. 107 – 120 p.
10. CARRASCO, J. (s.f). Erosión y manejo de aguas técnicas y prácticas productivas de conservación de suelos. INÍA. 35 p.
11. CERISOLA, C. (2015). Erosión hídrica. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Manejo y conservación de suelos. 41 p.
12. CHOW, V.; MAIDMENT, D. y MAYS, L. (1994). Hidrología aplicada. Santa Fe de Bogotá. Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.
13. CHUVIECO, E. (1994). “Fundamentos de teledetección espacial.” 3° Edición revisada.

14. CISNEROS, J; CHOLAKY, C.; CANTERO, A. y GONZALEZ, J. (2012). Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo. 1a ed. - Río Cuarto: UNIRÍO Editora. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
15. COLEGIO DE POSGRADUADOS. (1991). Manual de conservación del suelo y del agua. 3ª. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo - México
16. CORTES, V. (1991). "Erosión hídricas de suelos hortícolas: El caso de Cot y Tierra Blanca de Cartago". Costa Rica. Geoitsmo (C.R.). Vol. 1 y 2. 135-156.
17. DOIG, F. K. (2002). Historia y arte del Perú antiguo. Editor PEISA. Universidad de Michigan. USA. 1034 p.
18. DO PRADO, W. L. y DA VEIGA, M. (1994). "Relación entre erosión y pérdida de fertilidad del suelo". Extraído de: Erosión de suelos en América Latina. 1- Suelos y Aguas. Tema II Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. F.A.O. Santiago. Chile.
19. DUMAS, Á. (2012). Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo. Universitas Complutensis Matritensis (Universidad Complutense de Madrid). Máster en tecnologías de la información geográfica.
20. ELLISON, W.D. (1947). Soil erosion soil sci. Soc. Am. Proc., Madison, 12. 479 - 84 p.
21. FAO. (1995). Necesidades y recursos. Geografía de la agricultura y la alimentación. Roma.
22. FAO. (1997). Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación Roma. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68).
23. FAO. (2006). World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. Rome. FAO, 2006.
24. FARENA - UNA. Managua, Nicaragua. 118 p.
25. FIGUEROA, S.; AMANTE, O.; CORTÉS, T.; PIMENTEL, L.; OSUNA, C.; RODRÍGUEZ, O. y MORALES, F. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de agricultura y recursos hidráulicos. Colegio de Posgraduados. Salinas, San Luis Potosí, México.
26. FOURNIER, F. (1972). "Soil conservation". Nature and environment series N° 5, council of Europe, Strasbourg.

27. FOURNIER, F. (1975). Conservación de suelos. Mundi – Prensa. Madrid.
28. GARCÍA, J.; LLERENA, C. e INBAR, M. (2004). Los andenes y su microclima.
29. GIRALDEZ, J.; GONZALÉZ, P. y FERERRES, J. (1986). Aprovechamiento del agua del suelo en distintos sistemas de laboreo. Cinco años de experiencia en el valle de Guadalquivir. Grupo de trabajo sobre cultivo mínimo. I Simposium sobre mínimo laboreo en cultivos herbáceos. Madrid. 11-20 p.
30. GÓMEZ, J. A.; TAGUAS, E.; VANWALLEGHEM, T.; GIRÁLDEZ, J.; SÁNCHEZ, F.; LORA, A. y MORA, J. (2011). Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación. Consejería de agricultura y pesca. Sevilla. 58 p.
31. GONZÁLEZ, C. (s.f). Manejo de la esorrentía y control de erosión en la finca. Especialista en ambiente. Servicio de extensión agrícola. 16 p.
32. GRACIA, J. (s.f). Manual de ingeniería de ríos. Capítulo 17. UNAM.
33. GREGORY, J. and WALLING, E. (1985). Drenage bassin analysis. The Bath Press. Victoria, Australia. 451 p.
34. HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P. y BRAKENSIEK, D. L. (1982). “Hydrologic modeling of small watersheds”. ASAE. USA.
35. HENAO, S. (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.
36. HORTON, R. E. (1945). «Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology». Bulletin of the geological society of America, nº 56, 275-370 p.
37. HUARICCALLO, J. L. (2013). “Propuesta de estructuras de biotecnología para el control de erosión hídrica (cárcava) en la comunidad de Challacollo – Ilave – Puno - 2013”. Universidad Nacional del Altiplano - Facultad de Ingeniería Agrícola. Puno.
38. HUDSON, N. (1971). Soil conservation. 2ª Ed. Great Britain. Billing & Sons Ltd. 250-253 p.
39. HUDSON, N. (1982). Conservación del suelo. Editorial Reverte. España.
40. KLINGEBIEL, A. A. and MONTGOMERY, P. H. (1961). Land capability classification. Agricultural Handbook 210. Washington D.C. Soil conservation service. U.S.D.A. 21 p.

41. KRAUSE, M. y MELÉNDEZ, G., (1999). Manejo comunitario de los recursos naturales en laderas (CIAT - Laderas), centro internacional de agricultura tropical (CIAT).
42. LAFLÉN, J. M. (2003). "Predicción pionera de la erosión del suelo, la historia de USLE", Publicación especial de la asociación mundial de conservación de suelos y agua. 186 p.
43. LAL, R. (1990). "Soil erosion in the tropics". Edit. Mc Graw Hill Inc., USA.
44. LANGBEIN, W. B. and SCHUMM, S. A. (1958). Yields of sediment in relation to mean annual precipitation. Trans. Am. Geophys. USA.
45. LEÓN, V. P. (2008). Monitoreo y análisis comparativo de metodologías para la determinación de la erosión hídrica en una parcela experimental. Tesis. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.
46. LÓPEZ, F. (1999). Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Tragsa-Tragsatec - Ediciones Mundi Prensa. ISBN: 84-7114-474-3. Madrid. 902 p.
47. LLAMAS, J. (1993). Hidrología general. Principios y aplicaciones. Madrid, España. 635 p.
48. MAENE, L. M. and SULAIMAN, W. (1980). Status of soil conservation research in peninsular Malaysia and its future development. Ed. Soil erosion and its control. New York. 219 p.
49. MANCILLA, G. A. (2008). "Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Universidad de Chile.
50. MARTÍNEZ, M. (2005). Estimación de la erosión del suelo. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación - SAGARPA. México.
51. MAY, L. L. y SOUZA, M. L. P. (1990). Efeito de tres nlveis de erosao simulada na produçao de batata inglesa na regio de Contenda (PR). In: VII Congresso Brasileiro e encontro nacional de Pesquisa sobre conservaçao do solo. VIII, Londrina, 1990. Anais. Londrina, Sociedade brasileira de ciencia do solo, 74 p.
52. MCCOOL, D. K. and RENARD, K. G. (1990). Water erosion and water quality. Adv. Soil Sci. 13: 175–185 p.
53. MCCUEN, R. H. (1989). "Hydrologic analysis and design". Prentice Hall. USA.

54. MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES. (s.f.) Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Lima – Perú.
55. MINTEGUI, J. A. y LÓPEZ, F. (1990). La ordenación agrohidrológica en la planificación. Administración de la comunidad autónoma de Euskadi. Departamento de agricultura y pesca. Servicio central de publicaciones del gobierno Vasco. Vitoria - Gasteiz.
56. MORALES, J. (2001). Planificación y manejo integrado de cuencas hidrográficas.
57. MORGAN, R. P. C. (1986): Soil erosion & conservation. Longman. ISBN: 0-470-20671-3. Essex. England. 298 p.
58. MORGAN, R. P. C. (1997). Erosión y conservación del suelo. 2a edición Mundi -Prensa. Madrid, España.
59. MUJICA, A. (1996). Andenes: terrazas incas y paisaje. Roma. 16 p.
60. MURILLO, W. (2008). La investigación científica. Venezuela.
61. NÚÑEZ, S. J. (2001). Manejo y conservación de suelos. Euned. San José, Costa Rica.
62. ORDOÑEZ, J. J. (2011). ¿Qué es una cuenca? SENAMHI. Lima – Perú. 44 p.
63. PLÁ, I. (1994). Labranza y propiedades físicas de los suelos. Cursos sobre los efectos de labranzas en las propiedades físicas de los suelos. Buenos Aires, Argentina. 80 p.
64. PIMENTEL, D.; HARVEY, C. and ROSOSUDARMO, K. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science. Vol. 267. 1117- 1123 p.
65. PIZARRO, R.; ABARZA, A. y FLORES, J. (2001). Determinación de las curvas Intensidad – Duración - Frecuencia I-D-F, para 6 estaciones pluviográficas de la VII Región. Revista virtual de UNESCO. 48 p.
66. PIZARRO, R.; SANGÜESA, C.; FLORES, J.; MARTÍNEZ, A. y PONCE, M. (2004). Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. Chile.
67. PIZARRO, R.; FLORES, J. P.; SANGÜESA, C. y MARTÍNEZ, E. (2004). Monografías “Estándares de ingeniería para aguas y suelos. Zanjás de infiltración. Talca – Chile. 32 p.

68. PIZARRO, R. (2003). Manual de conservación de suelos. Instructivo Nº 1.  
Sociedad EIAS Ltda. Facultad de ciencias forestales. Universidad de Talca.
69. PORTUGUEZ, D. M. (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.
70. RAMOS, C. (2001). Modelamiento ambiental para análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del mapa de erosión (Sistema de información geográfica). UNALM.
71. RAZURI, L. (s.f). Estructuras de conservación de suelos y aguas. Centro interamericano de desarrollo integral de aguas y tierras. C.I.D.I.A.T. Mérida – Venezuela.
72. REMENIERAS, G. (1971). Tratado de hidrología aplicada. Editores Asociados. Madrid. España. 515 p.
73. REYNERO, M. A.; DIEZ, A. y BERGESIO, L. (1977). Convención de las Naciones Unidas. Lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África. Conferencia de las Naciones Unidas sobre la desertificación.
74. SALAS, D. (2004). Conservación y abandono de Andenes. Andenes, agrosistema frágil. Departamento de mecanización agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM). Lima-Perú.
75. SCHWAB, G. O. (1981). “Soil an water conservation engineering”. J. Wiley & Sons. USA.
76. SOLBRIG, O. T. (1995). Conferencia magistral. Actas de la conferencia mundial de la ingeniería y la alimentación. “Propuesta para el siglo XXI. Consejo profesional de ingeniería agronómica”. Buenos Aires.
77. SOMARRIBA, Ch. M. (1993). Texto básico de conservación de suelos y agua. Universidad Nacional Agraria, Managua Nicaragua.
78. SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E. R.; TORETA, D. M.; ROCHELE, T. C. y SHAYER, E. P. M. (1990). Erosao simulada e produtividade do milho. In: Congresso brasileiro e encontro nacional de Pesquisa sobre conservação do solo. Anais. Londrina, sociedade brasileira de ciencia do solo. 95 p.

79. SUÁREZ, J. (2001). Control de Erosión en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Bucaramanga - Colombia. ISBN 958-33-2734-4.
80. SUDAS (Statewidw urban desgn and specifications, USA). (2006). The erosion and sedimentation process. In iowa statewide urban desgn standards manual. Iowa, Estados Unidos.
81. TABOADA, L. (2011). Evaluación de la erosión hídrica en áreas con zanjas de infiltración. Determinación de la pérdida del suelo por erosión hídrica con clavos de erosión. Lima-Perú. 205 p.
82. TREACY, J. M. (1994). Las chacras de Coporaque: Andenería y riego en el valle del Colca. Instituto de estudios peruanos. Lima.
83. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). (1978). "Predicting rainfall erosion losses". Agriculture Handbook number 537. USA.
84. VÁSQUEZ, A. (2000). Manejo de cuencas altoandinas - tomo I. Escuela superior de administración de aguas. "Charles Sutton". Perú.
85. VILLÓN, M. (2002). Hidrología. Escuela de Ingeniería Agrícola. I. T. C. R. Cartago – Costa Rica.
86. WALLING, D. E. and FANG, D. (2003). "Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers." Global and Planetary Change.
87. WHITERS, B. and VIPOND, S. (1974). "Irrigation: design and practice". Batsford, London.
88. WILLIAMS, J. R. (1975). Sediment - yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Proceedings of the sediment - Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi.
89. WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. (1938). Rainfall energy and its relationship to soil loss". Transac.
90. WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. and UHLAND, R. E. (1958): Evaluation of factors in the soil - loss equation. Agricultural engineering.
91. WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, D.C.: U.S. Department of agriculture Handbook, N° 537.

### Citas electrónicas

1. <http://deconceptos.com/ciencias-sociales/antropicoelectronicas>.
2. <http://agrilife.jrc.ec.europa.eu/documents/ESFactSheet-02.pdf>.
3. <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-5/ccerosionymanejoescorrentiaescrito.pdf>.
4. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR28131.pdf>.
5. <http://mariela-medioambiente.blogspot.pe/2007/>
6. [http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/20435/mod\\_resource/content/1/TEORICO%20EROSION%20HIDRICA-MSF-2015.pdf](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/20435/mod_resource/content/1/TEORICO%20EROSION%20HIDRICA-MSF-2015.pdf).
7. <http://www.monografias.com/trabajos14/erosion/erosion.shtml>.
8. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/55313885e4b0b22a158062b2>.
9. <http://www.ecostrategia.com/articulos/glosario/glosario.pdf>.
10. [http://downloads.gvsig.org/download/events/gvSIG-Conference/10th-gvSIG-Conference/Reports/10J-Perdida\\_suelo\\_USLE.pdf](http://downloads.gvsig.org/download/events/gvSIG-Conference/10th-gvSIG-Conference/Reports/10J-Perdida_suelo_USLE.pdf).
11. [http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia\\_sup/SEDIMENTOS.pdf](http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/SEDIMENTOS.pdf).
12. <http://www.monografias.com/trabajos88/evaluacion-peligro-erosion-hidrica/evaluacion-peligro-erosion-hidrica.shtml>.
13. <https://es.wikipedia.org/wiki/Usle>.
14. [http://www.edafologia.net/erosion/tema4\\_evaluacion/4\\_evaluacion2010.pdf](http://www.edafologia.net/erosion/tema4_evaluacion/4_evaluacion2010.pdf).
15. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16850/AD%20%20K%20USLE.pdf?sequence=1>.
16. <https://es.slideshare.net/vandick20/recursos-naturales-iv>.
17. [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/soils/docs/Soil\\_map\\_FAO/UNESCO/robot/South\\_America\\_IV.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils/docs/Soil_map_FAO/UNESCO/robot/South_America_IV.pdf).
18. [file:///C:/Documents%20and%20Settings/Pastor/Mis%20documentos/Downloads/1044-2019-1-SM%20\(1\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Pastor/Mis%20documentos/Downloads/1044-2019-1-SM%20(1).pdf).
19. <http://www.auburn.edu/~clinedj/Spanish%20Publications%20Website/publications/Spanish%20WHAP/GT3%20Water%20Harvesting.pdf>.
20. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n5/n5a1.pdf>.
21. <http://www.fceia.unr.edu.ar/seminarios-dh->

curiham/Presentaciones/SDHC\_01\_Basile\_Transporte-Erosion-Sedimentaci%F3n.pdf.

22. <http://www.robertexto.com/archivo10/suelos1.htm>.

23. <http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/rev-agro/agrov08n2a04diazorita.pdf>.

24. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/download/7-3%5Carticle1.pdf>.

25. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/04/infiltracion-del-agua-en-el-suelo-importancia-y-metodos-para-medirla/>

26. [http://www.uach.cl/externos/epicforce/pdf/guias%20y%20manuales/eias/manuales/c\\_modulo\\_curva\\_infiltracion.pdf](http://www.uach.cl/externos/epicforce/pdf/guias%20y%20manuales/eias/manuales/c_modulo_curva_infiltracion.pdf).

27. <http://mundodeciencia1.blogspot.pe/p/el-suelo.html>.

28. <file:///C:/Documents%20and%20Settings/Pastor/Mis%20documentos/Downloads/254295.pdf>.

29. <http://moleskinearquitectonico.blogspot.pe/2010/07/andenes-terrazas-incas-y-paisaje.html>.

30. <http://visionagroecologica.blogspot.pe/2010/10/medidas-de-conservacion-de-suelos.html>.

31. <http://www.monografias.com/trabajos62/tipos-erosion-suelos/tipos-erosion-suelos.shtml>.

32. <http://erosionhidricaidinescarrillo.blogspot.pe/2015/07/republica-bolivariana-de-venezuela.html>.

33. [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_itop/415/pdfs/Capitulo%203.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%203.pdf).

34. <http://visionagroecologica.blogspot.pe/2010/10/medidas-de-conservacion-de-suelos.html>.

35. <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S03.htm>.

## Revistas

SALDAÑA, M., NEMMAOUI, A., CANTÓN, M., AGUILAR, M., AGUILAR, F. (2014). Estimación de la erosión potencial en la cuenca del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V. Universidad de Almería. Revista Mapping. Vol. 23. ISSN: 1131-9100.

VÁSQUEZ, A., TAPIA, M. (2011). Revista Ingeniería UC. Vol. 18. Nº 3.

# ANEXOS

## **8.1 Matriz de consistencia**

Cuadro 8.1 Matriz de Consistencia: Año – 2017

| PROBLEMAS                                                                                                                                                | OBJETIVOS                                                                                                                                  | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                     | VARIABLES                                                 | INDICADORES                                                                                                   | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. PROBLEMA PRINCIPAL</b>                                                                                                                             | <b>1. OBJETIVO GENERAL</b>                                                                                                                 | <b>1. HIPOTESIS GENERAL</b>                                                                                                                                                                                   | <b>1. VARIABLE INDEPENDIENTE</b>                          | <b>1. INDICADOR</b>                                                                                           | Tipo de Investigación: Aplicada (Procedimiento: Campo y gabinete)<br>Técnica: Observación y evaluación.<br>Uso del SIG y ArcGIS 10.3,<br>Método:<br>Método cualitativo y cuantitativo.<br>-Nivel de investigación: correlacional<br>Diseño de investigación: No experimental                                                                                                                                                                                                                                          |
| ¿No se tiene estudios de la estimación de la erosión hídrica y de un manejo adecuado del recurso suelo y del agua en la cuenca de Yucaes?                | Determinar y analizar la erosión hídrica para una conservación y desarrollo sostenible del recurso suelo y del agua en la cuenca de Yucaes | Existe una relación directa y significativa entre la erosión hídrica y el manejo adecuado del suelo y del agua en la cuenca de Yucaes                                                                         | - Cuenca hidrográfica (Unidad).                           | - Clima                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>                                                                                                                          | <b>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>                                                                                                            | <b>2. HIPOTESIS ESPECÍFICAS</b>                                                                                                                                                                               | <b>2. VARIABLE DEPENDIENTE</b>                            | <b>2. INDICADOR</b>                                                                                           | Diagrama de Diseño de la investigación:  Dónde:<br>M = Muestra<br>V1 = Cuenca hidrográfica.<br>Recurso suelo<br>V2 = Erosión hídrica (degradación)<br>r = relación<br>Población y muestra<br>. Población<br>- La población de la EPIA<br>. Muestra<br>- Nivel de confiabilidad<br>Fórmula de Kuder – Richardson.<br>Escala: Dicotómicos<br>- Prueba de hipótesis<br>.Coeficiente de correlación de Pearson:<br>Prueba de hipótesis |
| 1. ¿No se tiene estudios de los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos, para el manejo del recurso suelo y del agua en la cuenca Yucaes? | 1. Determinar los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca Yucaes.                                              | 1. Existe una relación directa y significativa entre el problema de la erosión hídrica y los parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos, para el manejo del suelo y del agua de la cuenca Yucaes. | - Parámetros agrológicos, geomorfológicos e hidrológicos, | - Uso de suelo.<br>- Unidad de parámetros geomorfológicos,<br>- Registros de Precipitación, caudales máximos. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2. ¿No se tiene estudios con la ecuación universal de pérdida de suelo USLE?                                                                             | 2. Realizar la modelación de la erosión hídrica con el método USLE.                                                                        | 2. Se tiene una relación directa y significativa entre la erosión y la precipitación.                                                                                                                         | - Pérdida del suelo<br>Erosión hídrica (degradación)      | - Ton./ha/año                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3. ¿No se hacen permanentemente trabajos de manejo y conservación de suelos y aguas en laderas para evitar la erosión hídrica en la cuenca de Yucaes?    | 3. Diseñar prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas para el control de la erosión hídrica en la cuenca de Yucaes.              | 3. Existe una relación directa y significativa entre el problema de la erosión hídrica y las prácticas de manejo del agua en laderas.                                                                         | - Diseños                                                 | - Área tratada.                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## 8.2 Encuesta

## Cuadro 8.2 Encuesta

Formato de la encuesta del “**Estimación de la Erosión Hídrica y el Manejo de Suelos y Aguas en la Cuenca de Yucaes -Huamanga - Ayacucho - 2017**”

Evaluator: Sta. Violeta Saccatoma Cacyamarca.....

Encuestado: .....

Institución: .....

Labor/cargo o actividad.....

DNI: .....

LUGAR – Distrito o Comunidad:.....

FECHA: .....TELEF/Celular.....

| Nº       | PREGUNTAS                                                                                                                                                                                                                                   | MARCAR CON UN<br>ASPA (X) |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----|
|          |                                                                                                                                                                                                                                             | SI                        | NO |
| <b>I</b> | <b>EROSIÓN HÍDRICA</b>                                                                                                                                                                                                                      |                           |    |
| 1        | ¿Sabe si existen asignaturas y planes de estudios en los Colegios y Universidades sobre la degradación del suelo y su impacto en el país?                                                                                                   |                           |    |
| 2        | ¿Sabe cómo se produce la degradación y solución de un suelo?                                                                                                                                                                                |                           |    |
| 3        | ¿Se recupera un suelo erosionado en corto tiempo?                                                                                                                                                                                           |                           |    |
| 4        | ¿Se encuentra integrada la universidad para solucionar el problema de la erosión hídrica y otros temas relacionados con organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)? |                           |    |
| 5        | ¿Existe por parte del estado y universidades, un interés de tratar la degradación del suelo en la sierra del país?                                                                                                                          |                           |    |
| 6        | ¿Son las actividades agrícolas las principales responsables del daño sobre el recurso suelo?                                                                                                                                                |                           |    |
| 7        | ¿La erosión del suelo es la mayor amenaza ambiental a la sostenibilidad y capacidad productiva agrícola?                                                                                                                                    |                           |    |
| 8        | ¿Hay alternativas amigables para preservar el recurso suelo?                                                                                                                                                                                |                           |    |

|           |                                                                                                                                                                                                                  |  |  |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| 9         | ¿Existe una deforestación sin restitución de árboles en la zona ocasionado por el hombre y el estado?                                                                                                            |  |  |
| 10        | ¿La lluvia sería el único factor determinante en los procesos de erosión hídrica?                                                                                                                                |  |  |
| <b>II</b> | <b>MEJORA DEL AGUA</b>                                                                                                                                                                                           |  |  |
| 11        | ¿Sabe sobre qué medidas correctoras se pueden adoptar para hacer frente a la erosión de los suelos y a otros problemas?                                                                                          |  |  |
| 12        | ¿Cree usted que las estrategias y programas de prevención contra la erosión que implementa el estado, tienen el fin de asegurar un uso sostenible del suelo?                                                     |  |  |
| 13        | ¿Se realiza una planificación sostenible en la ordenación del territorio?                                                                                                                                        |  |  |
| 14        | ¿El problema de la erosión requiere solo el reconocimiento de los procesos erosivos y el estudio de sus factores causales, para establecer políticas de conservación?                                            |  |  |
| 15        | ¿La incorporación de las técnicas de conservación de aguas y suelos (Andenes, camales de desviación, zanjales de infiltración. Etc.), demanda un importante esfuerzo técnico y económico. Actualmente son altos? |  |  |
| 16        | ¿Cree usted que únicamente el buen ordenamiento y planificación de los cultivos, sería la solución al problema de la degradación del suelo?                                                                      |  |  |
| 17        | ¿La problemática en las cuencas, en la mayoría de los casos, es el resultado de acciones antropogénicas que posteriormente se revierten en contra del hombre convirtiéndose en zonas o regiones desérticas?      |  |  |
| 18        | ¿Cree usted que existe un trabajo coordinado entre las instituciones gubernamentales y los actores involucrados para lograr la conservación del suelo y uso óptimo del recurso agua?                             |  |  |
| 19        | ¿Cree que solo la conservación del suelo mejora el aseguramiento de los alimentos?                                                                                                                               |  |  |
| 20        | ¿Cree usted que se está incrementando el número de estaciones hidrometeorológicas por parte del estado para los trabajos de investigación en la región de Ayacucho?                                              |  |  |

Fuente: Elaboración propia

ALGUNA SUGERENCIA DE SU PARTE A LA ENCUESTA

Se agradece su gentil participación

### **8.3 Cálculo del coeficiente de confiabilidad de Kuder & Richardson**

### 8.3.1 Fórmula de Kuder & Richardson

Para facilitar el cálculo de la confiabilidad con la técnica Kuder & Richardson es conveniente construir la matriz de puntaje del instrumento, ítem por ítem, tal como se presenta en una hoja de cálculo.

Cuadro 8.3 Cálculo del  $KR_{20}$  De Kuder & Richrdson

| n<br>Items | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15    | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | Total | n  |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|----|-------|----|
| 1          | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 10    | 1  |
| 2          | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 12    | 1  |
| 3          | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 13    | 1  |
| 4          | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 10    | 1  |
| 5          | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 5     | 1  |
| 6          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 12    | 1  |
| 7          | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 11    | 1  |
| 8          | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 11    | 1  |
| 9          | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 12    | 1  |
| 10         | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0     | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 12    | 1  |
| 11         | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 12    | 1  |
| 12         | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 9     | 1  |
| 13         | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 10    | 1  |
| 14         | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1     | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 7     | 1  |
| 15         | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1     | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 11    | 1  |
| 16         | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1     | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 15    | 1  |
| 17         | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1     | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 13    | 1  |
| 18         | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0     | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 10    | 1  |
| 19         | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2     | 1  |
| n          | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19.00 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19    | 19 |

19

|                                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| <b>SI</b>                      | 3.00  | 17.00 | 10.00 | 11.00 | 14.00 | 8.00  | 16.00 | 15.00 | 12.00 | 12.00 | 11.00 | 6.00  | 5.00  | 14.00 | 14.00 | 3.00  | 17.00 | 0.00  | 8.00  | 1.00  | 197    |
| <b>NO</b>                      | 16.00 | 2.00  | 9.00  | 8.00  | 5.00  | 11.00 | 3.00  | 4.00  | 7.00  | 7.00  | 8.00  | 13.00 | 14.00 | 5.00  | 5.00  | 16.00 | 2.00  | 19.00 | 11.00 | 18.00 |        |
| <b>p =</b>                     | 0.16  | 0.89  | 0.53  | 0.58  | 0.74  | 0.42  | 0.84  | 0.79  | 0.63  | 0.63  | 0.58  | 0.32  | 0.26  | 0.74  | 0.74  | 0.16  | 0.89  | 0.00  | 0.42  | 0.05  |        |
| <b>q =</b>                     | 0.84  | 0.11  | 0.47  | 0.42  | 0.26  | 0.58  | 0.16  | 0.21  | 0.37  | 0.37  | 0.42  | 0.68  | 0.74  | 0.26  | 0.26  | 0.84  | 0.11  | 1.00  | 0.58  | 0.95  |        |
| <b><math>\sum_{p*q}</math></b> | 0.13  | 0.09  | 0.25  | 0.24  | 0.19  | 0.24  | 0.13  | 0.17  | 0.23  | 0.23  | 0.24  | 0.22  | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.13  | 0.09  | 0.00  | 0.24  | 0.05  | 3.4848 |

Fuente: Elaboración propia

$$KR_{20} = \frac{n}{n-1} * \left( 1 - \frac{\sum p*q}{\sigma_T^2} \right) = 0.6479. \text{ Como resultado se obtuvo un } \mathbf{KR_{20} = 0.6479}.$$

La interpretación de los valores se tomará en cuenta en la escala sugerida por Guilford (1954) donde el coeficiente de confiabilidad es alta, ver cuadro 8.4

Cuadro 8.4 Valores de niveles de confiabilidad

| Valores     | Nivel de confiabilidad |
|-------------|------------------------|
| 0 – 0.20    | Muy baja               |
| 0.21 a 0.40 | Baja                   |
| 0.41 a 0.60 | Moderada               |
| 0.61 a 0.80 | Alta                   |
| 0.81 a 1.00 | Muy alta               |

Fuente: Guilford (1954)

En la prueba piloto realizada a las encuestas a través del nivel de confiabilidad de Kuder y Richardson se ha obtenido un valor de  $KR_{20} = 0.6479$ , que analizado con el cuadro 8.4 indicado por Caballero (2014), de la interpretación de los valores que se tomarán en cuenta en la escala sugerida por Guilford (1954), el nivel de confiabilidad de la investigación es de alta confiabilidad.

## **8.4 Parámetros geomorfológicos**

### 8.4.1 Determinación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca de Yucaes

#### a. Área y perímetro de la cuenca

Área total de la cuenca = 692.80 km<sup>2</sup>

Perímetro de la cuenca = 155.36 km

Longitud del río más largo = 59.63 km

Cuadro 8.5 Áreas parciales y acumuladas según la altitud para graficar la curva hipsométrica y el polígono de frecuencia de la cuenca de Yucaes

| Altitud<br>m.s.n.m. | Áreas parciales |               | Áreas acumuladas |        |                 |        |
|---------------------|-----------------|---------------|------------------|--------|-----------------|--------|
|                     |                 |               | Por debajo       |        | Por encima      |        |
|                     | km <sup>2</sup> | %             | km <sup>2</sup>  | %      | km <sup>2</sup> | %      |
| 2500.00             | 0.00            | 0.00          | 0.000            | 0.0    | 692.80          | 100.00 |
| 2743.75             | 19.78           | 2.86          | 19.780           | 2.86   | 673.02          | 97.14  |
| 2987.50             | 72.88           | 10.52         | 92.660           | 13.37  | 600.14          | 86.63  |
| 3231.25             | 77.82           | 11.23         | 170.480          | 24.61  | 522.32          | 75.39  |
| 3475.00             | 121.24          | 17.50         | 291.720          | 42.11  | 401.08          | 57.89  |
| 3718.75             | 94.09           | 13.58         | 385.810          | 55.69  | 306.99          | 44.31  |
| 3962.50             | 92.33           | 13.33         | 478.140          | 69.02  | 214.66          | 30.98  |
| 4206.25             | 187.70          | 27.09         | 665.840          | 96.11  | 26.96           | 3.89   |
| 4450.00             | 26.96           | 3.89          | 692.800          | 100.00 | 0.00            | 0.00   |
| <b>Total</b>        | <b>692.80</b>   | <b>100.00</b> |                  |        |                 |        |

Fuente: Elaboración propia

#### b. Factor de relieve

##### b.1 Cálculo de la curva Hipsométrica

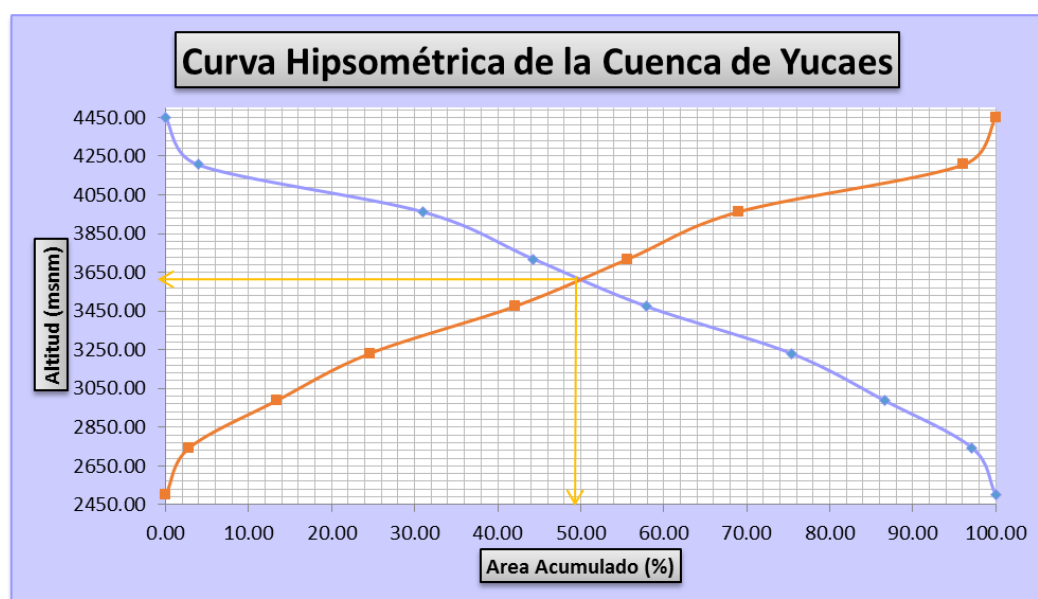


Gráfico 8.1 Curva hipsométrica de la cuenca de Yucaes

Fuente: Elaboración propia

Altitud mediana = 3610.00 msnm ((Intersección de las curvas hipsométrica)

## b.2 Altitud media Ponderada

$$c_i = \frac{(c_i + c_{i+1})}{2}$$

$$H = \frac{\sum a_i * c_i}{A}$$

$c_i$  = cota de la curva actual

$c_{i-1}$  = cota de la curva anterior

$a_i$  = cada una de las areas parciales

Cuadro 8.6 Altitud media ponderada

| $a_i$  | $c_i$    | $a_i * c_i$ |
|--------|----------|-------------|
| 19.78  | 2621.88  | 51860.69    |
| 72.88  | 2865.63  | 208846.75   |
| 77.82  | 3109.38  | 241971.56   |
| 121.24 | 3353.13  | 406532.88   |
| 94.09  | 3596.88  | 338429.97   |
| 92.33  | 3840.63  | 354604.91   |
| 187.70 | 4084.38  | 766637.19   |
| 26.96  | 4328.13  | 116686.25   |
| 692.80 | 27800.00 | 2485570.19  |

Fuente: Elaboración propia

$H = 3587.72$  msnm

## b.3 Altitud Media Simple

$$H_{ms} = \frac{c_M + c_m}{2}$$

$C_M = 4450.00$  msnm

$C_m = 2500.00$  msnm

$H_{ms} = 3475.00$  msnm

#### b.4 Polígono de Frecuencia de Áreas Parciales

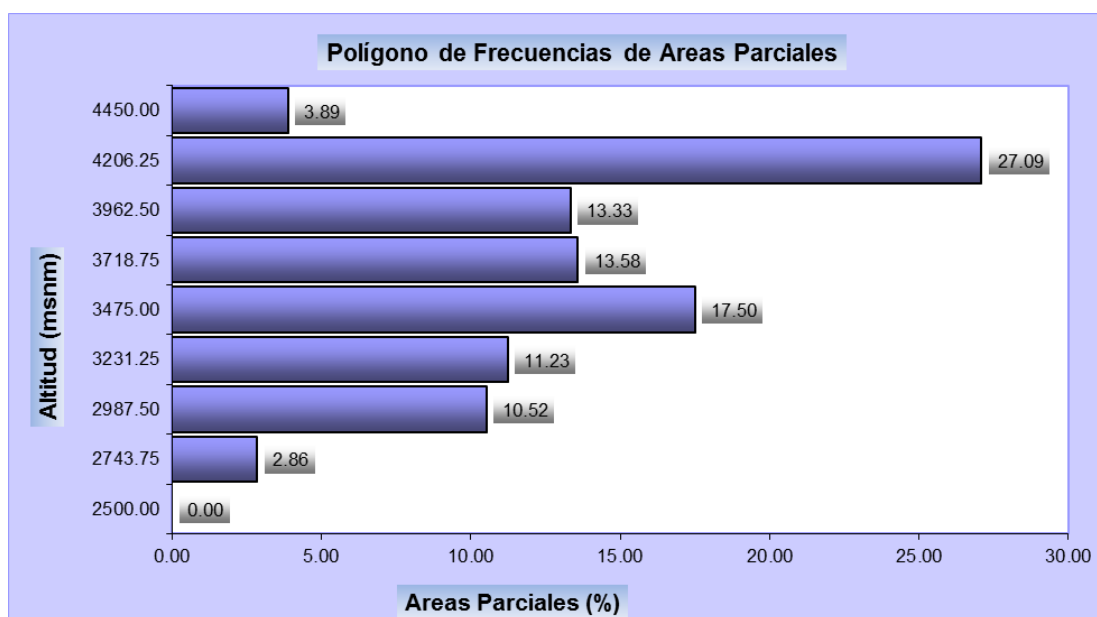


Gráfico 8.2 Polígono de frecuencia de áreas parciales

Fuente: Elaboración propia

#### c. Parámetros de forma

##### c.1 El índice de Gravelious o Coeficiente de Compacidad (K)

Datos de ingreso

Perímetro de la cuenca (P) = 155.36 km

Área total de la cuenca = 692.80 km<sup>2</sup>

Resultados

$$K = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Coeficiente de compacidad (K) = 1.65

##### c.2 Rectángulo Equivalente

Datos de ingreso

Perímetro de la cuenca (P) = 155.36 km

Área total de la cuenca = 692.80 km<sup>2</sup>

## Resultados

$$L = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$$

L = lado mayor

l = lado menor

$$L_e = \frac{a_i}{l}$$

Le = ancho parcial en Km

a<sub>i</sub>= Área parcial en Km<sup>2</sup>

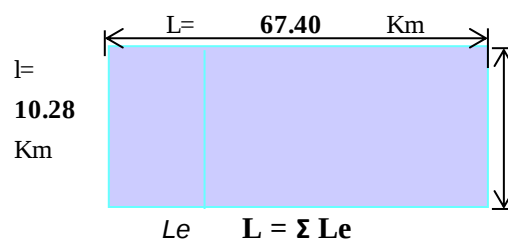
Cuadro 8.7 Cálculo del ancho parcial del rectángulo equivalente

| Altitud<br>m.s.n.m | Área                                            |                     |
|--------------------|-------------------------------------------------|---------------------|
|                    | Parcial<br>(a <sub>i</sub> ) en Km <sup>2</sup> | Ancho<br>(Le) en Km |
| 2500.00            | 0.00                                            | 0.00                |
| 2743.75            | 19.78                                           | 1.92                |
| 2987.50            | 72.88                                           | 7.09                |
| 3231.25            | 77.82                                           | 7.57                |
| 3475.00            | 121.24                                          | 11.80               |
| 3718.75            | 94.09                                           | 9.15                |
| 3962.50            | 92.33                                           | 8.98                |
| 4206.25            | 187.70                                          | 18.26               |
| 4450.00            | 26.96                                           | 2.62                |
|                    | <b>692.80</b>                                   | <b>67.40</b>        |

Fuente: Elaboración propia

L = 67.40 km

l = 10.28 km



### c.3 Factor Forma

$$F_f = \frac{l}{L} = \frac{A}{L^2}$$

F<sub>f</sub> = 0.15

#### d. Perfil longitudinal del río

Cuadro 8.7 Cálculo del perfil longitudinal del río

| Altitud<br>(m.s.n.m) | Longitud del río |              | Longitud<br>Acum.<br>(km) | Pendiente<br>(%) | 1/(S)^0.5    |
|----------------------|------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------|
|                      | (m)              | (Km)         |                           |                  |              |
| 2500.00              | 0                | 0            | 0                         | 0                | 0            |
| 2743.80              | 16249.67         | 16.25        | 16.25                     | 1.50             | 8.16         |
| 2987.50              | 13209.71         | 13.21        | 29.46                     | 1.85             | 7.36         |
| 3231.30              | 8072.27          | 8.07         | 37.53                     | 3.02             | 5.75         |
| 3475.00              | 6180.79          | 6.18         | 43.71                     | 3.94             | 5.04         |
| 3718.80              | 4983.48          | 4.98         | 48.70                     | 4.89             | 4.52         |
| 3962.50              | 3888.47          | 3.89         | 52.58                     | 6.27             | 3.99         |
| 4206.30              | 7036.83          | 7.04         | 59.62                     | 3.46             | 5.37         |
| 4450.00              | 10.00            | 0.01         | 59.63                     | 2437.50          | 0.20         |
| <b>Total</b>         | <b>59631.22</b>  | <b>59.63</b> |                           |                  | <b>40.41</b> |

Fuente: Elaboración propia

n = 8

Según Taylor y Schwarz

$$S = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

S = 0.0392 = 3.92%

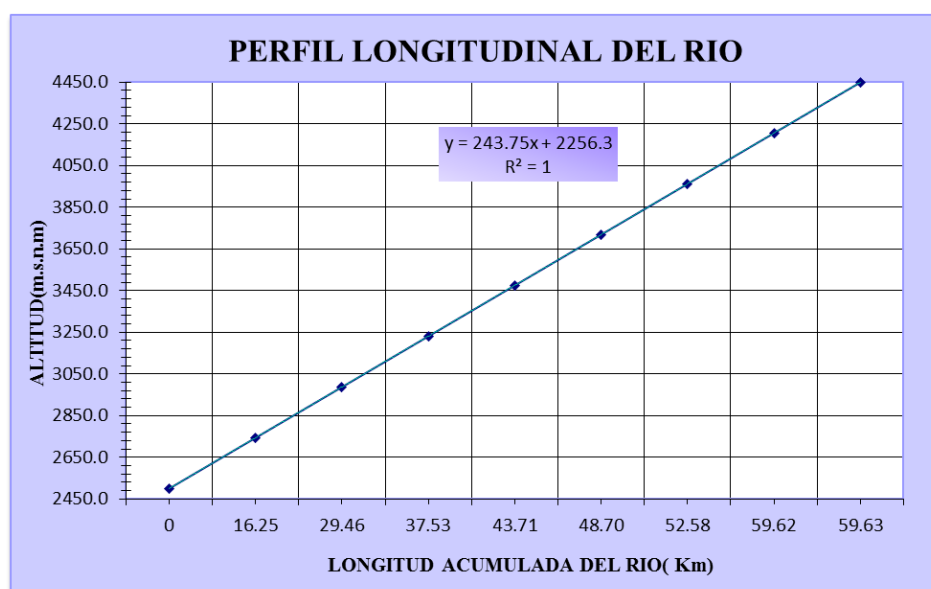


Gráfico 8.3 Perfil longitudinal del río Yucaes

Fuente: Elaboración propia

## **e. Parámetros relacionados con la red hidrográfica**

### **e.1 Densidad de corrientes**

$$D_c = \frac{N_c}{A}$$

$N_c$  = Número de corrientes permanentes e intermitentes = 1225

$A$  = Área total de la cuenca = 692.80 km<sup>2</sup>

$D_c$  = 1.77

### **e.2 Densidad de drenaje**

$$D_d = \frac{L_i}{A}$$

Longitud del cauce principal = 59.63 km

Longitud del cauce aportadores = 845.90

$L_i$  = Long.Total Cauces = 905.53

$A$  = Área total de la cuenca = 692.80 km<sup>2</sup>

$D_d$  = 1.31

### **e.3 Tiempo de concentración (Tc) , según Kirpich**

$$T_c = 0.01947 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

$L$  = Longitud del cauce principal = 59631.22 m

$H$  = Diferencia de nivel, entre la salida de la cuenca y el punto hidráulicamente más bajo = 1950 m

$T_c$  = 345.44 min

$T_c$  = 5.76 horas

## **f. Otros parámetros**

### **f.1 Índice de Pendiente (Ip)**

$$I_p = \sum_{i=1}^n (\sqrt{\beta_1 * (c_i - c_{i+1})} * \frac{1}{\sqrt{L}})$$

$$\beta_i = \frac{a_i}{A_t}$$

Donde:

$L$  = lado mayor del rectángulo equivalente.

$A_t$  = Área total.

$c_i$  = Cota de la curva actual.

$c_{i-1}$  = Cota de la curva anterior.

$a_i$  = Cada una de las áreas parciales.

Cuadro 8.9: Cálculo del índice de pendiente

| <b>ai</b><br><b>1</b> | <b>Bi = ai/At</b><br><b>2</b> | <b>ci - ci-1</b><br><b>3</b> | <b>Bi* (ci -ci-1)</b><br><b>4</b> | <b>Raíz (4)</b><br><b>5</b> | <b>5 * 1/(L)^0.5</b><br><b>6</b> |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 0.00                  | 0.00                          | 0.00                         | 0.00                              | 0.00                        | 0.00                             |
| 19.78                 | 0.03                          | 243.75                       | 6.96                              | 2.64                        | 0.32                             |
| 72.88                 | 0.11                          | 243.75                       | 25.64                             | 5.06                        | 0.62                             |
| 77.82                 | 0.11                          | 243.75                       | 27.38                             | 5.23                        | 0.64                             |
| 121.24                | 0.18                          | 243.75                       | 42.66                             | 6.53                        | 0.80                             |
| 94.09                 | 0.14                          | 243.75                       | 33.10                             | 5.75                        | 0.70                             |
| 92.33                 | 0.13                          | 243.75                       | 32.48                             | 5.70                        | 0.69                             |
| 187.70                | 0.27                          | 243.75                       | 66.04                             | 8.13                        | 0.99                             |
| 26.96                 | 0.04                          | 243.75                       | 9.49                              | 3.08                        | 0.38                             |
| 692.80                |                               |                              |                                   |                             |                                  |
|                       |                               |                              |                                   | <b>Ip =</b>                 | <b>5.13</b>                      |

Fuente: Elaboración propia

## f.2Pendiente de la Cuenca

$$S = \frac{H}{L}$$

$H = 1.95$  km

$L = 67.40$  km

$S = 2.89$  %

## **8.5 Parámetros hidrológicos**

## 8.5.1 Determinación de la precipitación promedio anual por el método del Polígono de Thiessen

Cuadro 8.10: Estaciones y áreas de influencia

| Estación     | Áreas Parciales (km <sup>2</sup> ) |
|--------------|------------------------------------|
| Wayllapampa  | 283.23                             |
| Chontaca     | 230.04                             |
| Allpachaca   | 68.95                              |
| Pampas       | 110.59                             |
| <b>Total</b> | <b>692.80</b>                      |

Cuadro 8.11: Precipitación mensual de la estación meteorológica de Wayllapampa

| Nombre de Estación: WAYLLAPAMPA |        |         |        | Río:                   |       |       | Región: AYACUCHO    |        |           | Latitud Sur: 13°04' 36"   |           |           |
|---------------------------------|--------|---------|--------|------------------------|-------|-------|---------------------|--------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|
| Codigo de Estación: 664         |        |         |        | Cuenca: Cuenca Mantaro |       |       | Provincia: HUAMANGA |        |           | Longitud Oeste: 74°13'13" |           |           |
| Tipo de Estación: CLIMÁTICA     |        |         |        | Pfafstetter: 4996      |       |       | Distrito: PACAYCASA |        |           | Altitud: 2,470.00         |           |           |
| Año                             | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril                  | Mayo  | Junio | Julio               | Agosto | Setiembre | Octubre                   | Noviembre | Diciembre |
| 2000                            | 98.10  | 188.90  | 179.90 | 13.10                  | 21.60 | 14.60 | 26.00               | 6.20   | 5.90      | 30.60                     | 10.00     | 106.50    |
| 2001                            | 286.30 | 163.00  | 116.00 | 23.20                  | 34.40 | 4.00  | 39.30               | 18.40  | 21.90     | 49.30                     | 65.80     | 35.40     |
| 2002                            | 90.90  | 126.20  | 193.60 | 32.30                  | 17.50 | 2.20  | 34.80               | 22.10  | 30.20     | 21.90                     | 43.2      | 91.50     |
| 2003                            | 39.60  | 180.40  | 124.10 | 81.40                  | 5.50  | 1.90  | 0.00                | 17.00  | 19.50     | 0.00                      | 13.70     | 64.90     |
| 2004                            | 114.50 | 83.70   | 69.90  | 9.70                   | 9.20  | 6.20  | 20.60               | 8.90   | 26.80     | 41.60                     | 47.30     | 136.70    |
| 2005                            | 64.30  | 61.70   | 47.6   | 18.90                  | 28.30 | 0.00  | 3.10                | 5.40   | 5.50      | 50.70                     | 30.20     | 93.80     |
| 2006                            | 117.00 | 86.10   | 124.80 | 36.50                  | 7.40  | 4.40  | 3.00                | 15.00  | 19.60     | 41.5                      | 91.90     | 77.10     |
| 2007                            | 61.80  | 73.70   | 121.60 | 39.20                  | 25.70 | 9.60  | 4.70                | 6.90   | 14.60     | 45.70                     |           | 73.60     |
| 2008                            | 87.40  | 71.90   | 47.80  | 16.20                  | 24.2  | 2.80  | 0.30                | 3.60   | 11.00     | 14.40                     | 26.80     | 71.60     |
| 2009                            | 104.20 | 141.70  | 38.2   | 49.30                  | 15.70 | 0.4   | 3.90                | 8.20   | 15.30     | 41.60                     | 76.70     | 134.70    |
| Promedio                        | 106.41 | 117.73  | 106.35 | 31.98                  | 18.95 | 4.61  | 13.57               | 11.17  | 17.03     | 33.73                     | 45.07     | 88.58     |

Cuadro 8.12: Precipitación mensual de la estación meteorológica de Chontaca

|                     |        |         |        |       |                      |       |       |        |           |                     |           |           |
|---------------------|--------|---------|--------|-------|----------------------|-------|-------|--------|-----------|---------------------|-----------|-----------|
| ESTACION : CHONTACA |        |         |        |       | DISTRITO : ACOCRO    |       |       |        |           | ALTITUD: 3525.0     |           |           |
| CODIGO : 010        |        |         |        |       | PROVINCIA : HUAMANGA |       |       |        |           | LATITUD: 13°16'57"  |           |           |
| AÑO : 2009          |        |         |        |       | REGION : AYACUCHO    |       |       |        |           | LONGITUD: 74°02'42" |           |           |
| Año                 | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril | Mayo                 | Junio | Julio | Agosto | Setiembre | Octubre             | Noviembre | Diciembre |
| 2000                | 241.3  | 243.7   | 159.4  | 39.6  | 12.8                 | 27.0  | 33.7  | 9.2    | 28.9      | 102.1               | 19.1      | 66.1      |
| 2001                | 295.0  | 79.6    | 193.5  | 58.5  | 60.4                 | 22.6  | 28.7  | 23.4   | 20.0      | 45.2                | 77.3      | 72.3      |
| 2002                | 115.5  | 187.4   | 184.0  | 178.3 | 14.9                 | 2.4   | 52.6  | 18.0   | 51.8      | 38.4                | 120.5     | 111.8     |
| 2003                | 89.3   | 175.8   | 174.7  | 120.6 | 13.4                 | 0.1   | 0.0   | 39.3   | 15.5      | 44.7                | 35.9      | 122.9     |
| 2004                | 75.3   | 100.9   | 37.3   | 15.3  | 4.4                  | 5.7   | 23.9  | 9.0    | 31.8      | 25.5                | 26.6      | 95.0      |
| 2005                | 83.7   | 84.3    | 66.5   | 10.9  | 0.0                  | 0.0   | 9.2   | 2.5    | 28.0      | 59.2                | 36.2      | 129.8     |
| 2006                | 124.1  | 153.7   | 121.9  | 46.6  | 1.8                  | 4.5   | 0.0   | 9.8    | 16.4      | 83.8                | 85.5      | 87.4      |
| 2007                | 89.5   | 59.9    | 132.4  | 55.5  | 5.8                  | 1.2   | 15.9  | 2.7    | 9.5       | 67.0                | 52.5      | 98.0      |
| 2008                | 163.6  | 123.6   | 100.6  | 40.1  | 17.7                 | 6.2   | 0.0   | 6.0    | 15.8      | 59.6                | 38.0      | 53.6      |
| 2009                | 82.3   | 120.0   | 80.5   | 55.8  | 23.9                 | 8.9   | 12.6  | 15.4   | 25.9      | 53.2                | 64.7      | 94.8      |
| Promedio            | 135.96 | 132.89  | 125.08 | 62.12 | 15.52                | 7.87  | 17.65 | 13.53  | 24.36     | 57.86               | 55.63     | 93.18     |

Cuadro 8.13: Precipitación mensual de la estación meteorológica de Allpachaca

|                                |        |         |        |                        |       |       |                     |        |           |                           |           |           |
|--------------------------------|--------|---------|--------|------------------------|-------|-------|---------------------|--------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|
| Nombre de Estación: ALLPACHACA |        |         |        | Río:                   |       |       | Región: AYACUCHO    |        |           | Latitud Sur: 13°23'19"    |           |           |
| Codigo de Estación: 000662     |        |         |        | Cuenca: Cuenca Mantaro |       |       | Provincia: HUAMANGA |        |           | Longitud Oeste: 74°16'00" |           |           |
| Tipo de Estación: CLIMÁTICA    |        |         |        | Pfafstetter: 4996      |       |       | Distrito: CHIARA    |        |           | Altitud: 3,600.00         |           |           |
| Año                            | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril                  | Mayo  | Junio | Julio               | Agosto | Setiembre | Octubre                   | Noviembre | Diciembre |
| 2000                           | 160.00 | 243.00  | 118.00 | 56.00                  | 42.00 | 22.00 | 19.00               | 29.00  | 9.00      | 68.00                     | 39.00     | 83.00     |
| 2001                           | 167.00 | 98.00   | 178.00 | 19.00                  | 41.00 | 3.94  | 12.00               | 10.00  | 19.00     | 16.00                     | 79.00     | 65.00     |
| 2002                           | 73.00  | 252.00  | 183.00 | 28.00                  | 12.00 | 3.00  | 42.00               | 11.00  | 48.00     | 52.00                     | 55.00     | 156.00    |
| 2003                           | 101.00 | 140.00  | 176.00 | 51.00                  | 17.00 | 0.00  | 2.00                | 17.00  | 20.00     | 20.00                     | 58.00     | 140.00    |
| 2004                           | 83.00  | 169.00  | 124.00 | 38.00                  | 6.00  | 3.94  | 28.00               | 11.00  | 48.00     | 16.00                     | 46.00     | 167.00    |
| 2005                           | 104.00 | 82.00   | 156.00 | 20.00                  | 3.00  | 0.00  | 12.00               | 22.00  | 36.00     | 49.00                     | 32.00     | 131.00    |
| 2006                           | 128.00 | 107.00  | 105.00 | 66.00                  | 0.00  | 3.00  | 0.00                | 27.00  | 10.00     | 80.00                     | 115.00    | 131.00    |
| 2007                           | 86.00  | 124.00  | 212.00 | 38.00                  | 23.00 | 0.00  | 5.00                | 0.00   | 10.00     | 45.00                     | 31.00     | 134.00    |
| 2008                           | 127.00 | 170.00  | 123.00 | 11.00                  | 29.00 | 7.00  | 1.00                | 1.00   | 29.00     | 62.00                     | 37.00     | 120.3     |
| 2009                           | 134.90 | 139.52  | 161.57 | 37.58                  | 17.95 | 3.94  | 8.82                | 16.68  | 29.23     | 44.47                     | 56.43     | 111.65    |
| Promedio                       | 116.39 | 152.45  | 153.66 | 36.46                  | 19.09 | 4.68  | 12.98               | 14.47  | 25.82     | 45.25                     | 54.84     | 123.90    |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.14: Precipitación mensual de la estación meteorológica de Pampas

|           |                 |         |        |       |       |               |       |        |           |             |           |           |             |
|-----------|-----------------|---------|--------|-------|-------|---------------|-------|--------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| ESTACION: | PAMPAS          |         |        |       | LAT:  | 13° 26' 12.2" |       | S      |           | Region :    |           |           | Apurímac    |
| TIPO:     | CP              |         |        |       | LONG: | 73° 49' 29"   |       | W      |           | Provincia : |           |           | Andahuaylas |
| CUENCA:   | Pampas Apurímac |         |        |       | ALT:  | 2,737         |       | msnm   |           | Distrito :  |           |           | Andahuaylas |
| Año       | Enero           | Febrero | Marzo  | Abril | Mayo  | Junio         | Julio | Agosto | Setiembre | Octubre     | Noviembre | Diciembre |             |
| 2000      | 108.1           | 119.22  | 102.21 | 32.13 | 7.58  | 1.88          | 4     | 8.27   | 17.48     | 29.9        | 51.93     | 99.18     |             |
| 2001      | 325.4           | 235.2   | 199.4  | 116   | 44.2  | 12            | 19.9  | 29.9   | 56.1      | 72.6        | 135.2     | 260.9     |             |
| 2002      | 15.3            | 50.8    | 41     | 0     | 0     | 0             | 0     | 0      | 0         | 0           | 0.2       | 21.6      |             |
| 2003      | 108.1           | 119.22  | 102.21 | 32.13 | 7.58  | 0             | 0     | 9.2    | 8.2       | 11.9        | 32        | 99.18     |             |
| 2004      | 79              | 123.1   | 54.6   | 20.6  | 6.8   | 5.2           | 19.9  | 12.3   | 18        | 35.5        | 38.6      | 260.9     |             |
| 2005      | 54.2            | 65.8    | 115.4  | 17.3  | 0     | 0             | 2.7   | 0      | 17.48     | 29.9        | 51.93     | 21.6      |             |
| 2006      | 120.5           | 65.8    | 114.4  | 24.4  | 0     | 0.7           | 0     | 9      | 8.2       | 23.4        | 54.2      | 100.2     |             |
| 2007      | 43.2            | 68.4    | 123.4  | 46    | 0     | 0             | 4     | 0      | 0         | 72.6        | 89.2      | 150.2     |             |
| 2008      | 108.1           | 72.6    | 73     | 21.4  | 0     | 0             | 0     | 0      | 9         | 2           | 51.93     | 56        |             |
| 2009      | 120.4           | 129     | 72     | 95    | 11    | 0             | 8.2   | 0      | 0         | 30          | 135.2     | 146.2     |             |
| Promedio  | 108.23          | 104.91  | 99.76  | 40.50 | 7.72  | 1.98          | 5.87  | 6.87   | 13.45     | 30.78       | 64.04     | 121.60    |             |

Cuadro 8.15: Precipitación promedio de la cuenca de Yucaes

| Año      | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Setiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | Total  |
|----------|--------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|
| 2000     | 153.42 | 201.35  | 154.53 | 29.21 | 18.48 | 17.44 | 24.34 | 9.79   | 15.70     | 57.94   | 22.59     | 89.58     | 794.37 |
| 2001     | 283.56 | 140.38  | 161.21 | 49.33 | 45.27 | 11.44 | 29.95 | 21.06  | 26.44     | 48.33   | 82.02     | 86.61     | 985.60 |
| 2002     | 85.21  | 147.00  | 165.00 | 75.18 | 13.29 | 2.01  | 35.87 | 16.11  | 34.32     | 26.88   | 63.16     | 93.51     | 757.54 |
| 2003     | 73.15  | 165.09  | 142.57 | 83.51 | 9.60  | 0.81  | 0.20  | 23.16  | 16.42     | 18.73   | 28.40     | 97.10     | 658.74 |
| 2004     | 92.68  | 104.19  | 62.02  | 16.12 | 6.90  | 5.65  | 22.32 | 9.69   | 29.17     | 32.73   | 38.91     | 145.70    | 566.08 |
| 2005     | 73.08  | 71.88   | 75.49  | 16.10 | 11.87 | 0.00  | 5.95  | 5.23   | 17.92     | 50.03   | 35.84     | 97.93     | 461.32 |
| 2006     | 121.01 | 107.39  | 120.21 | 40.86 | 3.62  | 3.70  | 1.23  | 13.51  | 15.76     | 56.49   | 86.06     | 89.57     | 659.41 |
| 2007     | 70.44  | 73.28   | 134.47 | 45.58 | 14.72 | 4.32  | 8.34  | 3.72   | 10.12     | 57.00   | 34.76     | 99.94     | 556.69 |
| 2008     | 119.95 | 98.94   | 76.84  | 24.45 | 18.66 | 3.90  | 0.22  | 3.56   | 14.07     | 32.17   | 35.55     | 67.98     | 496.29 |
| 2009     | 102.57 | 132.25  | 69.92  | 57.59 | 17.90 | 3.51  | 7.97  | 10.13  | 17.76     | 43.89   | 80.04     | 120.99    | 664.52 |
| Promedio | 117.5  | 124.2   | 116.2  | 43.8  | 16.0  | 5.3   | 13.6  | 11.6   | 19.8      | 42.4    | 50.7      | 98.9      | 660.06 |

Fuente: Elaboración propia

Precipitación promedio anual: 660.06mm

### 8.5.2 Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F)

Datos para calcular los caudales máximos

#### a. Tiempo de concentración

Método de Kirpich:

$$T_c = 0.01947 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

#### b. Cálculo de intensidad máxima

Metodo IILA Senamhi – UNI:

$$i_{(T,T_R)} = a * (T + b)^{c+1} * (1 + k * \log T_R)$$

Parámetros constantes

Constante regional : a = 12.10 adim.

Constante regional : b = 0.40 hr.

Constante regional : c = 0.242 adim.

Constante estadística : k = 0.553 adim.

Cuadro 8.16 Intensidades máximas para diferentes periodos de retorno

| <b>T</b><br><b>(min)</b> | <b>TR</b><br><b>5</b> | <b>TR</b><br><b>10</b> | <b>TR</b><br><b>15</b> | <b>TR</b><br><b>20</b> | <b>TR</b><br><b>25</b> | <b>TR</b><br><b>30</b> | <b>TR</b><br><b>40</b> | <b>TR</b><br><b>50</b> |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 10                       | 25.804                | 28.902                 | 30.715                 | 32.001                 | 32.998                 | 33.813                 | 35.099                 | 36.096                 |
| 20                       | 21.223                | 23.772                 | 25.262                 | 26.320                 | 27.140                 | 27.810                 | 28.868                 | 29.688                 |
| 30                       | 18.172                | 20.354                 | 21.630                 | 22.535                 | 23.238                 | 23.812                 | 24.717                 | 25.419                 |
| 40                       | 15.976                | 17.894                 | 19.016                 | 19.812                 | 20.430                 | 20.934                 | 21.730                 | 22.348                 |
| 50                       | 14.311                | 16.029                 | 17.035                 | 17.748                 | 18.301                 | 18.753                 | 19.466                 | 20.019                 |
| 60                       | 13.000                | 14.561                 | 15.474                 | 16.122                 | 16.624                 | 17.035                 | 17.683                 | 18.185                 |
| 70                       | 11.938                | 13.371                 | 14.209                 | 14.804                 | 15.266                 | 15.643                 | 16.238                 | 16.699                 |
| 80                       | 11.057                | 12.385                 | 13.161                 | 13.712                 | 14.140                 | 14.489                 | 15.040                 | 15.467                 |
| 90                       | 10.314                | 11.552                 | 12.276                 | 12.790                 | 13.189                 | 13.515                 | 14.029                 | 14.427                 |
| 100                      | 9.677                 | 10.839                 | 11.518                 | 12.001                 | 12.375                 | 12.680                 | 13.162                 | 13.537                 |
| 110                      | 9.124                 | 10.220                 | 10.861                 | 11.315                 | 11.668                 | 11.956                 | 12.411                 | 12.764                 |
| 120                      | 8.640                 | 9.677                  | 10.284                 | 10.715                 | 11.049                 | 11.321                 | 11.752                 | 12.086                 |
| 130                      | 8.211                 | 9.197                  | 9.774                  | 10.183                 | 10.500                 | 10.760                 | 11.169                 | 11.486                 |
| 140                      | 7.829                 | 8.769                  | 9.319                  | 9.709                  | 10.011                 | 10.259                 | 10.649                 | 10.951                 |
| 150                      | 7.485                 | 8.384                  | 8.910                  | 9.283                  | 9.572                  | 9.809                  | 10.182                 | 10.471                 |
| 160                      | 7.175                 | 8.036                  | 8.540                  | 8.898                  | 9.175                  | 9.402                  | 9.759                  | 10.037                 |
| 170                      | 6.893                 | 7.720                  | 8.205                  | 8.548                  | 8.814                  | 9.032                  | 9.376                  | 9.642                  |
| 180                      | 6.635                 | 7.432                  | 7.898                  | 8.228                  | 8.485                  | 8.694                  | 9.025                  | 9.282                  |
| 190                      | 6.399                 | 7.167                  | 7.616                  | 7.935                  | 8.183                  | 8.385                  | 8.704                  | 8.951                  |
| 200                      | 6.181                 | 6.923                  | 7.357                  | 7.665                  | 7.904                  | 8.099                  | 8.407                  | 8.646                  |
| 210                      | 5.980                 | 6.698                  | 7.118                  | 7.416                  | 7.647                  | 7.836                  | 8.134                  | 8.365                  |
| 220                      | 5.793                 | 6.489                  | 6.896                  | 7.184                  | 7.408                  | 7.591                  | 7.880                  | 8.104                  |
| 230                      | 5.619                 | 6.294                  | 6.689                  | 6.969                  | 7.186                  | 7.363                  | 7.643                  | 7.861                  |
| 240                      | 5.457                 | 6.113                  | 6.496                  | 6.768                  | 6.979                  | 7.151                  | 7.423                  | 7.634                  |
| 250                      | 5.306                 | 5.943                  | 6.315                  | 6.580                  | 6.785                  | 6.952                  | 7.217                  | 7.422                  |
| 260                      | 5.163                 | 5.783                  | 6.146                  | 6.403                  | 6.603                  | 6.766                  | 7.023                  | 7.223                  |
| 270                      | 5.030                 | 5.634                  | 5.987                  | 6.238                  | 6.432                  | 6.591                  | 6.841                  | 7.036                  |
| 280                      | 4.904                 | 5.493                  | 5.837                  | 6.081                  | 6.271                  | 6.426                  | 6.670                  | 6.860                  |
| 290                      | 4.785                 | 5.359                  | 5.696                  | 5.934                  | 6.119                  | 6.270                  | 6.508                  | 6.693                  |
| 300                      | 4.673                 | 5.234                  | 5.562                  | 5.795                  | 5.975                  | 6.123                  | 6.356                  | 6.536                  |
| 310                      | 4.566                 | 5.114                  | 5.435                  | 5.663                  | 5.839                  | 5.983                  | 6.211                  | 6.387                  |
| 320                      | 4.465                 | 5.001                  | 5.315                  | 5.537                  | 5.710                  | 5.851                  | 6.074                  | 6.246                  |
| 330                      | 4.369                 | 4.894                  | 5.201                  | 5.418                  | 5.587                  | 5.725                  | 5.943                  | 6.112                  |
| 340                      | 4.278                 | 4.792                  | 5.092                  | 5.305                  | 5.471                  | 5.606                  | 5.819                  | 5.984                  |
| 350                      | 4.191                 | 4.694                  | 4.989                  | 5.197                  | 5.359                  | 5.492                  | 5.701                  | 5.863                  |

Fuente: Elaboración propia

$$I_{\max} = \frac{a}{b + T} \quad a_1 = \text{intersección eje} \quad b_1 = \text{pendiente recta}$$

$$b_1 = \frac{n * \sum XY - \sum X * \sum Y}{n * \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad b = \frac{a_1}{b_1}$$

$$a_1 = \bar{Y} - b_1 * \bar{X} \quad a = \frac{1}{b_1}$$

Cuadro 8.17 Cálculos de los parámetros estadísticos de Talbolt para los periodos de retorno de 5 y 10 años

| TIEMPO DE RETORNO = 5 |         |         |          |           |
|-----------------------|---------|---------|----------|-----------|
| n=30                  | X = T   | Y = 1/i | XY       | X2        |
| 1                     | 10      | 0.039   | 0.388    | 100       |
| 2                     | 20      | 0.047   | 0.942    | 400       |
| 3                     | 30      | 0.055   | 1.651    | 900       |
| 4                     | 40      | 0.063   | 2.504    | 1600      |
| 5                     | 50      | 0.070   | 3.494    | 2500      |
| 6                     | 60      | 0.077   | 4.615    | 3600      |
| 7                     | 70      | 0.084   | 5.864    | 4900      |
| 8                     | 80      | 0.090   | 7.235    | 6400      |
| 9                     | 90      | 0.097   | 8.726    | 8100      |
| 10                    | 100     | 0.103   | 10.334   | 10000     |
| 11                    | 110     | 0.110   | 12.055   | 12100     |
| 12                    | 120     | 0.116   | 13.889   | 14400     |
| 13                    | 130     | 0.122   | 15.832   | 16900     |
| 14                    | 140     | 0.128   | 17.882   | 19600     |
| 15                    | 150     | 0.134   | 20.039   | 22500     |
| 16                    | 160     | 0.139   | 22.300   | 25600     |
| 17                    | 170     | 0.145   | 24.663   | 28900     |
| 18                    | 180     | 0.151   | 27.128   | 32400     |
| 19                    | 190     | 0.156   | 29.693   | 36100     |
| 20                    | 200     | 0.162   | 32.357   | 40000     |
| 21                    | 210     | 0.167   | 35.118   | 44100     |
| 22                    | 220     | 0.173   | 37.976   | 48400     |
| 23                    | 230     | 0.178   | 40.930   | 52900     |
| 24                    | 240     | 0.183   | 43.978   | 57600     |
| 25                    | 250     | 0.188   | 47.120   | 62500     |
| 26                    | 260     | 0.194   | 50.354   | 67600     |
| 27                    | 270     | 0.199   | 53.681   | 72900     |
| 28                    | 280     | 0.204   | 57.098   | 78400     |
| 29                    | 290     | 0.209   | 60.606   | 84100     |
| 30                    | 300     | 0.214   | 64.204   | 90000     |
| 31                    | 310     | 0.219   | 67.890   | 96100     |
| 32                    | 320     | 0.224   | 71.665   | 102400    |
| 33                    | 330     | 0.229   | 75.527   | 108900    |
| 34                    | 340     | 0.234   | 79.477   | 115600    |
| 35                    | 350     | 0.239   | 83.512   | 122500    |
| $\Sigma =$            | 6300    | 5.140   | 1130.727 | 1491000   |
| $\bar{U} =$           | 180.000 | 0.147   | 32.306   | 42600.000 |

$b_1 =$  0.0005759  
 $a_1 =$  0.04318  
 $a =$  1736.360  
 $b =$  74.976

| TIEMPO DE RETORNO = 10 |         |         |          |           |
|------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| n=30                   | X = T   | Y = 1/i | XY       | X2        |
| 1                      | 10      | 0.035   | 0.346    | 100       |
| 2                      | 20      | 0.042   | 0.841    | 400       |
| 3                      | 30      | 0.049   | 1.474    | 900       |
| 4                      | 40      | 0.056   | 2.235    | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.062   | 3.119    | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.069   | 4.121    | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.075   | 5.235    | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.081   | 6.460    | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.087   | 7.791    | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.092   | 9.226    | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.098   | 10.763   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.103   | 12.400   | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.109   | 14.135   | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.114   | 15.966   | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.119   | 17.891   | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.124   | 19.909   | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.130   | 22.019   | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.135   | 24.220   | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.140   | 26.510   | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.144   | 28.888   | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.149   | 31.354   | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.154   | 33.905   | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.159   | 36.542   | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.164   | 39.264   | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.168   | 42.069   | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.173   | 44.957   | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.178   | 47.926   | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.182   | 50.978   | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.187   | 54.110   | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.191   | 57.322   | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.196   | 60.613   | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.200   | 63.983   | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.204   | 67.432   | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.209   | 70.957   | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.213   | 74.561   | 122500    |
| $\Sigma =$             | 6300    | 4.589   | 1009.522 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.131   | 28.843   | 42600.000 |

$b_1 =$  0.0005142  
 $a_1 =$  0.03855  
 $a =$  1944.831  
 $b =$  74.9762

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.18 Cálculos de los parámetros estadísticos de Talbolt para los periodos de retorno de 15 y 20 años

| TIEMPO DE RETORNO = 15 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.033   | 0.326   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.040   | 0.792   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.046   | 1.387   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.053   | 2.103   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.059   | 2.935   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.065   | 3.877   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.070   | 4.926   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.076   | 6.078   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.081   | 7.331   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.087   | 8.682   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.092   | 10.128  | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.097   | 11.668  | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.102   | 13.301  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.107   | 15.024  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.112   | 16.835  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.117   | 18.735  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.122   | 20.720  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.127   | 22.791  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.131   | 24.946  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.136   | 27.184  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.140   | 29.504  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.145   | 31.905  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.150   | 34.386  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.154   | 36.947  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.158   | 39.587  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.163   | 42.304  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.167   | 45.099  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.171   | 47.970  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.176   | 50.917  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.180   | 53.939  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.184   | 57.037  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.188   | 60.208  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.192   | 63.453  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.196   | 66.771  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.200   | 70.161  | 122500    |
| $\Sigma =$             | 6300    | 4.318   | 949.957 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.123   | 27.142  | 42600.000 |

$$\begin{aligned} a1 &= 0.036276828 & a &= 2066.779 \\ b1 &= 0.0004838 & b &= 74.976 \end{aligned}$$

| TIEMPO DE RETORNO = 20 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.031   | 0.312   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.038   | 0.760   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.044   | 1.331   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.050   | 2.019   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.056   | 2.817   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.062   | 3.722   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.068   | 4.728   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.073   | 5.834   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.078   | 7.037   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.083   | 8.333   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.088   | 9.721   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.093   | 11.200  | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.098   | 12.766  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.103   | 14.420  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.108   | 16.159  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.112   | 17.982  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.117   | 19.888  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.122   | 21.875  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.126   | 23.944  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.130   | 26.092  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.135   | 28.318  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.139   | 30.623  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.143   | 33.005  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.148   | 35.462  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.152   | 37.996  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.156   | 40.604  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.160   | 43.287  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.164   | 46.042  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.169   | 48.871  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.173   | 51.772  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.177   | 54.745  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.181   | 57.789  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.185   | 60.903  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.188   | 64.088  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.192   | 67.342  | 122500    |
| $\Sigma =$             | 6300    | 4.144   | 911.786 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.118   | 26.051  | 42600.000 |

$$\begin{aligned} a1 &= 0.034819165 & a &= 2153.302 \\ b1 &= 0.0004644 & b &= 74.976 \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.19 Cálculos de los parámetros estadísticos de Talbolt para los periodos de retorno de 25 y 30 años

| TIEMPO DE RETORNO = 25 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.030   | 0.303   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.037   | 0.737   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.043   | 1.291   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.049   | 1.958   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.055   | 2.732   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.060   | 3.609   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.066   | 4.585   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.071   | 5.658   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.076   | 6.824   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.081   | 8.081   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.086   | 9.427   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.091   | 10.861  | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.095   | 12.380  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.100   | 13.984  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.104   | 15.670  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.109   | 17.438  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.113   | 19.287  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.118   | 21.214  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.122   | 23.220  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.127   | 25.303  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.131   | 27.462  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.135   | 29.697  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.139   | 32.007  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.143   | 34.391  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.147   | 36.847  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.151   | 39.377  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.155   | 41.978  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.159   | 44.651  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.163   | 47.394  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.167   | 50.207  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.171   | 53.090  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.175   | 56.042  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.179   | 59.062  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.183   | 62.151  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.187   | 65.307  | 122500    |
| $\sum =$               | 6300    | 4.019   | 884.227 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.115   | 25.264  | 42600.000 |

$$\begin{aligned} a1 &= 0.033766747 \\ b1 &= 0.0004504 \end{aligned} \quad \begin{aligned} a &= 2220.415 \\ b &= 74.976 \end{aligned}$$

| TIEMPO DE RETORNO = 30 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.030   | 0.296   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.036   | 0.719   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.042   | 1.260   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.048   | 1.911   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.053   | 2.666   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.059   | 3.522   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.064   | 4.475   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.069   | 5.522   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.074   | 6.659   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.079   | 7.886   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.084   | 9.200   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.088   | 10.599  | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.093   | 12.082  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.097   | 13.647  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.102   | 15.293  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.106   | 17.018  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.111   | 18.822  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.115   | 20.703  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.119   | 22.660  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.123   | 24.693  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.128   | 26.800  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.132   | 28.982  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.136   | 31.236  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.140   | 33.562  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.144   | 35.959  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.148   | 38.428  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.152   | 40.966  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.156   | 43.575  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.159   | 46.252  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.163   | 48.997  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.167   | 51.811  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.171   | 54.691  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.175   | 57.639  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.178   | 60.653  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.182   | 63.733  | 122500    |
| $\sum =$               | 6300    | 3.922   | 862.916 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.112   | 24.655  | 42600.000 |

$$\begin{aligned} a1 &= 0.032952946 \\ b1 &= 0.0004395 \end{aligned} \quad \begin{aligned} a &= 2275.250 \\ b &= 74.976 \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.20 Cálculos de los parámetros estadísticos de Talbolt para los periodos de retorno de 40 y 50 años

| TIEMPO DE RETORNO = 40 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.028   | 0.285   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.035   | 0.693   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.040   | 1.214   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.046   | 1.841   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.051   | 2.569   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.057   | 3.393   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.062   | 4.311   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.066   | 5.319   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.071   | 6.415   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.076   | 7.597   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.081   | 8.863   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.085   | 10.211  | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.090   | 11.639  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.094   | 13.147  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.098   | 14.732  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.102   | 16.395  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.107   | 18.132  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.111   | 19.944  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.115   | 21.830  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.119   | 23.788  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.123   | 25.819  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.127   | 27.920  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.131   | 30.091  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.135   | 32.332  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.139   | 34.642  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.142   | 37.020  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.146   | 39.466  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.150   | 41.978  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.154   | 44.557  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.157   | 47.202  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.161   | 49.913  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.165   | 52.688  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.168   | 55.527  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.172   | 58.431  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.175   | 61.398  | 122500    |
| $\Sigma =$             | 6300    | 3.779   | 831.303 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.108   | 23.752  | 42600.000 |

$$a1 = 0.031745719 \quad \begin{matrix} a = 2361.773 \\ b = 74.976 \end{matrix}$$

Fuente: Elaboración propia

| TIEMPO DE RETORNO = 50 |         |         |         |           |
|------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| n=18                   | X = T   | Y = 1/i | XY      | X2        |
| 1                      | 10      | 0.028   | 0.277   | 100       |
| 2                      | 20      | 0.034   | 0.674   | 400       |
| 3                      | 30      | 0.039   | 1.180   | 900       |
| 4                      | 40      | 0.045   | 1.790   | 1600      |
| 5                      | 50      | 0.050   | 2.498   | 2500      |
| 6                      | 60      | 0.055   | 3.299   | 3600      |
| 7                      | 70      | 0.060   | 4.192   | 4900      |
| 8                      | 80      | 0.065   | 5.172   | 6400      |
| 9                      | 90      | 0.069   | 6.238   | 8100      |
| 10                     | 100     | 0.074   | 7.387   | 10000     |
| 11                     | 110     | 0.078   | 8.618   | 12100     |
| 12                     | 120     | 0.083   | 9.929   | 14400     |
| 13                     | 130     | 0.087   | 11.318  | 16900     |
| 14                     | 140     | 0.091   | 12.784  | 19600     |
| 15                     | 150     | 0.096   | 14.325  | 22500     |
| 16                     | 160     | 0.100   | 15.942  | 25600     |
| 17                     | 170     | 0.104   | 17.631  | 28900     |
| 18                     | 180     | 0.108   | 19.393  | 32400     |
| 19                     | 190     | 0.112   | 21.227  | 36100     |
| 20                     | 200     | 0.116   | 23.131  | 40000     |
| 21                     | 210     | 0.120   | 25.105  | 44100     |
| 22                     | 220     | 0.123   | 27.148  | 48400     |
| 23                     | 230     | 0.127   | 29.260  | 52900     |
| 24                     | 240     | 0.131   | 31.439  | 57600     |
| 25                     | 250     | 0.135   | 33.685  | 62500     |
| 26                     | 260     | 0.138   | 35.997  | 67600     |
| 27                     | 270     | 0.142   | 38.375  | 72900     |
| 28                     | 280     | 0.146   | 40.818  | 78400     |
| 29                     | 290     | 0.149   | 43.326  | 84100     |
| 30                     | 300     | 0.153   | 45.898  | 90000     |
| 31                     | 310     | 0.157   | 48.533  | 96100     |
| 32                     | 320     | 0.160   | 51.232  | 102400    |
| 33                     | 330     | 0.164   | 53.993  | 108900    |
| 34                     | 340     | 0.167   | 56.816  | 115600    |
| 35                     | 350     | 0.171   | 59.701  | 122500    |
| $\Sigma =$             | 6300    | 3.674   | 808.334 | 1491000   |
| $\bar{U} =$            | 180.000 | 0.105   | 23.095  | 42600.000 |

$$a1 = 0.030868552 \quad \begin{matrix} a = 2428.885 \\ b = 74.976 \end{matrix}$$

Cuadro 8.21 Resumen de los parámetros estadísticos de Talbolt para diferentes periodos de retorno

| TR | a1         | b1         | a         | b        |
|----|------------|------------|-----------|----------|
| 5  | 0.04318008 | 0.00057592 | 1736.3603 | 74.97618 |
| 10 | 0.03855151 | 0.00051418 | 1944.8311 | 74.97618 |
| 15 | 0.03627683 | 0.00048384 | 2066.7787 | 74.97618 |
| 20 | 0.03481917 | 0.00046440 | 2153.3020 | 74.97618 |
| 25 | 0.03376675 | 0.00045037 | 2220.4146 | 74.97618 |
| 30 | 0.03295295 | 0.00043951 | 2275.2496 | 74.97618 |
| 40 | 0.03174572 | 0.00042341 | 2361.7728 | 74.97618 |
| 50 | 0.03086855 | 0.00041171 | 2428.8854 | 74.97618 |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.22 Intensidades máximas ajustada para diferentes periodos de retorno

| T     | TR          | TR           | TR           | TR           | TR           | TR           | TR           | TR           |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (min) | TR = 5 AÑOS | TR = 10 AÑOS | TR = 15 AÑOS | TR = 20 AÑOS | TR = 25 AÑOS | TR = 30 AÑOS | TR = 40 AÑOS | TR = 50 AÑOS |
| 10    | 20.433      | 22.887       | 24.322       | 25.340       | 26.130       | 26.775       | 27.793       | 28.583       |
| 20    | 18.282      | 20.477       | 21.761       | 22.672       | 23.379       | 23.956       | 24.867       | 25.574       |
| 30    | 16.541      | 18.526       | 19.688       | 20.512       | 21.152       | 21.674       | 22.498       | 23.137       |
| 40    | 15.102      | 16.915       | 17.976       | 18.728       | 19.312       | 19.789       | 20.541       | 21.125       |
| 50    | 13.894      | 15.562       | 16.537       | 17.230       | 17.767       | 18.205       | 18.898       | 19.435       |
| 60    | 12.864      | 14.409       | 15.312       | 15.953       | 16.450       | 16.857       | 17.498       | 17.995       |
| 70    | 11.977      | 13.415       | 14.256       | 14.853       | 15.316       | 15.694       | 16.291       | 16.754       |
| 80    | 11.204      | 12.549       | 13.336       | 13.894       | 14.327       | 14.681       | 15.240       | 15.673       |
| 90    | 10.525      | 11.789       | 12.528       | 13.052       | 13.459       | 13.791       | 14.316       | 14.723       |
| 100   | 9.923       | 11.115       | 11.812       | 12.306       | 12.690       | 13.003       | 13.498       | 13.881       |
| 110   | 9.387       | 10.514       | 11.173       | 11.641       | 12.004       | 12.300       | 12.768       | 13.131       |
| 120   | 8.905       | 9.975        | 10.600       | 11.044       | 11.388       | 11.669       | 12.113       | 12.457       |
| 130   | 8.471       | 9.488        | 10.083       | 10.505       | 10.833       | 11.100       | 11.522       | 11.850       |
| 140   | 8.077       | 9.047        | 9.614        | 10.016       | 10.329       | 10.584       | 10.986       | 11.298       |
| 150   | 7.718       | 8.645        | 9.187        | 9.571        | 9.870        | 10.113       | 10.498       | 10.796       |
| 160   | 7.390       | 8.277        | 8.796        | 9.164        | 9.450        | 9.683        | 10.051       | 10.337       |
| 170   | 7.088       | 7.939        | 8.437        | 8.790        | 9.064        | 9.288        | 9.641        | 9.915        |
| 180   | 6.810       | 7.628        | 8.106        | 8.445        | 8.708        | 8.923        | 9.263        | 9.526        |
| 190   | 6.553       | 7.340        | 7.800        | 8.126        | 8.380        | 8.587        | 8.913        | 9.166        |
| 200   | 6.315       | 7.073        | 7.516        | 7.831        | 8.075        | 8.274        | 8.589        | 8.833        |
| 210   | 6.093       | 6.825        | 7.252        | 7.556        | 7.792        | 7.984        | 8.288        | 8.523        |
| 220   | 5.886       | 6.593        | 7.007        | 7.300        | 7.527        | 7.713        | 8.007        | 8.234        |
| 230   | 5.693       | 6.377        | 6.777        | 7.061        | 7.281        | 7.460        | 7.744        | 7.964        |
| 240   | 5.513       | 6.175        | 6.562        | 6.836        | 7.049        | 7.224        | 7.498        | 7.711        |
| 250   | 5.343       | 5.985        | 6.360        | 6.626        | 6.833        | 7.001        | 7.268        | 7.474        |
| 260   | 5.184       | 5.806        | 6.170        | 6.428        | 6.629        | 6.792        | 7.051        | 7.251        |
| 270   | 5.033       | 5.638        | 5.991        | 6.242        | 6.436        | 6.595        | 6.846        | 7.041        |
| 280   | 4.891       | 5.479        | 5.822        | 6.066        | 6.255        | 6.410        | 6.653        | 6.842        |
| 290   | 4.757       | 5.329        | 5.663        | 5.900        | 6.084        | 6.234        | 6.471        | 6.655        |
| 300   | 4.631       | 5.187        | 5.512        | 5.743        | 5.921        | 6.068        | 6.298        | 6.477        |
| 310   | 4.510       | 5.052        | 5.369        | 5.593        | 5.768        | 5.910        | 6.135        | 6.309        |
| 320   | 4.396       | 4.924        | 5.233        | 5.452        | 5.622        | 5.760        | 5.980        | 6.149        |
| 330   | 4.288       | 4.802        | 5.103        | 5.317        | 5.483        | 5.618        | 5.832        | 5.998        |
| 340   | 4.184       | 4.687        | 4.980        | 5.189        | 5.351        | 5.483        | 5.691        | 5.853        |
| 350   | 4.086       | 4.576        | 4.863        | 5.067        | 5.225        | 5.354        | 5.557        | 5.715        |

Fuente: Elaboración propia

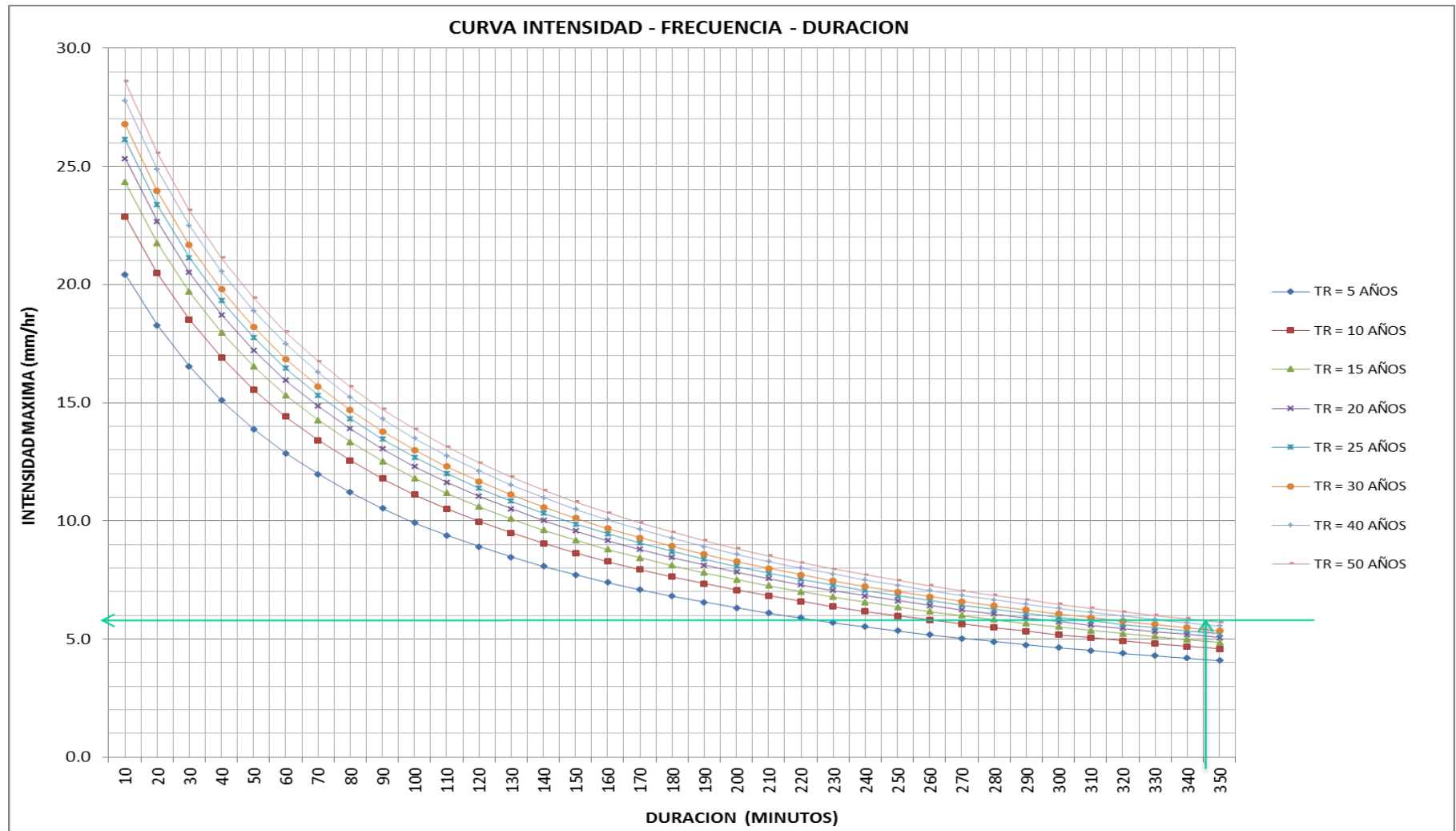


Gráfico 8.4 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia

Fuente: Elaboración propia

### 8.5.3 Cálculo del caudal máximo

Los métodos propuestos para el cálculo del caudal máximo son los siguientes:

#### 8.5.3.1 Método Racional Modificado

D e la información hidrológica, y de la fórmula:

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.278 * C * I * A * K$$

Q = Descarga máxima de diseño (m3/s)

C = Coeficiente de escorrentía

I = Intensidad (mm/hr) de la precipitación pluvial máxima correspondiente a un Tc y Tr

Ac = Área de la cuenca en (km2)

A= Área de influencia considerado como el 30 % del área de la cuenca

K = Coeficiente de Uniformidad

$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14}$$

Tc = Tiempo de concentración (horas)

Cálculo del coeficiente de escorrentía

- Valores del coeficiente de escorrentía “C”

Cuadro 8.23 Valores de K

| Condición                        | Valores         |                   |                |               |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|---------------|
| <b>1. Relieve del terreno</b>    | K1 = 40         | K1 = 30           | K1 = 20        | K1 = 10       |
|                                  | Muy accidentado | Accidentado       | Ondulado       | Llano         |
|                                  | S > 30 %        | S = (10 % a 30 %) | S = (5% a 10%) | S < 5%        |
| <b>2. Permeabilidad suelo</b>    | K2 = 20         | K2 = 15           | K2 = 10        | K2 = 5        |
|                                  | Muy impermeable | mas impermeable   | permeable      | muy permeable |
|                                  | roca sana       | arcilla           | poca suelta    | tierra suelta |
| <b>3. Vegetación</b>             | K3 = 20         | K3 = 15           | K3 = 10        | K3 = 5        |
|                                  | Sin vegetacion  | poca < 10%        | bastante a 50% | mucha a 90%   |
| <b>4. Capacidad de retención</b> | K4 = 20         | K4 = 15           | K4 = 10        | K4 = 5        |
|                                  | Ninguna         | Poca              | Bastante       | Mucha         |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.24 Cálculo de K

| $K = K1+K2+K3+K4$ | C           |    |
|-------------------|-------------|----|
| 100               | <b>0.80</b> | 20 |
| 75                | <b>0.65</b> | 10 |
| 50                | <b>0.50</b> | 15 |
| 30                | <b>0.35</b> | 15 |
| 25                | <b>0.20</b> | 60 |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.25 Coeficiente de escorrentía

| Tipo de superficie             | Coeficiente de escorrentía |
|--------------------------------|----------------------------|
| Pavimento Asfáltico y Concreto | 0.70 - 0.95                |
| Adoquines                      | 0.50 - 0.70                |
| Superficie de grava            | 0.15 - 0.30                |
| Bosques                        | 0.10 - 0.20                |
| Zonas de vegetación densa      |                            |
| . Terrenos granulares          | 0.10 - 0.80                |
| . Terrenos arcillosos          | 0.30 - 0.75                |
| Tierra sin vegetación          | 0.20 - 0.80                |
| Zonas cultivadas               | 0.20 - 0.40                |

Fuente: Elaboración propia

C = 0.56, para la región de Ayacucho

Cuadro 8.26 Cálculo del caudal máximo con el método Racional Modificado

|      |               |                 |
|------|---------------|-----------------|
| C =  | <b>0.56</b>   | Adim            |
| I =  | <b>5.80</b>   | mm/hr           |
| Ac = | <b>692.80</b> | Km <sup>2</sup> |
| A =  | <b>207.84</b> | Km <sup>2</sup> |
| K =  | <b>1.39</b>   | Adim            |

Fuente: Elaboración propia

| INTENSIDAD MAXIMA |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| Tc =              | 5.76  | hr    |
| TR =              | 50.00 | años  |
| I max =           | 5.80  | mm/hr |

$$Q_{\text{máx}} = 260.70 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 8.5.3.2 Método de Mac Math

#### a. Datos

Área de la cuenca: A = 69280.00 has

Intensidad máxima: I = 5.80 mm/hr

Pendiente promedio del cauce:  $S = 3.27 \%$

Longitud del río más largo:  $L = 59.63 \text{ km}$

Desnivel de cuenca:  $H = 1950.00 \text{ m}$

### **b. Fórmula empírica**

$$Q = 0.0091 * C * I * A^{\frac{4}{5}} * S^{\frac{1}{5}}$$

Donde:

$Q$  = Caudal máximo con un periodo de retorno de  $T$  años, en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$C$  = Factor de escorrentía de Mac Math, representa las características de la cuenca.

$I$  = Intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración  $T_c$  y un periodo de retorno de  $T$  años  $\text{mm/hr}$ .

$A$  = Área de la cuenca en Has.

$S$  = Pendiente promedio del cauce principal en ‰.

### **c. Parámetros**

#### **c.1 El factor C**

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Donde:

$C_1$  = Esta en función de la cobertura vegetal

$C_2$  = Esta en función de la textura del suelo

$C_3$  = Esta en función de la topografía del terreno

Para determinar el valor del factor  $C$ , utilizaremos el cuadro 1.2.

$$C = 0.42$$

#### **c.2 Para calcular la intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración $T_c$ y un periodo de retorno de $T$ años $\text{mm/hr}$**

El valor de  $i$  intensidad es igual al tiempo de concentración

$$T_c = 345.44 \text{ min}$$

$$T_r = 50 \text{ años}$$

$$T_c = 5.76 \text{ hr}$$

Reemplazando en la formula empírica obtenemos un caudal máximo de  $209.47 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 8.5.3.3 Método de Iszkowski

#### a. Datos

Área de la cuenca:  $A = 69280.00$  has

Precipitación promedio:  $P = 660.06$  mm

#### b. Fórmula empírica

$$Q_{m\acute{a}x} = m * C * A * p * 10^{-3}$$

Donde:

$Q$  = Caudal máximo con un periodo de retorno de  $T$  años, en  $m^3/s$ .

$m$  y  $C$  = son constantes proporcionadas en los cuadros 8.28 y 8.29 que dependen del tamaño del área de la cuenca y de las características del suelo y de la topografía.

$C$  = Coeficiente de escurrimiento.

$A$  = Área de la cuenca en  $km^2$ .

$p$  = Precipitación promedio, en mm/año.

#### c. Parámetros

##### c.1 El valor de $m$ de Iszkowsky

Para determinar el valor de " $m$ ", utilizaremos el cuadro 1.3 y tomaremos valores que está en dentro del área de la cuenca de Yucaes.

Tabular:

|     |     |
|-----|-----|
| 500 | 4.9 |
|-----|-----|

|        |   |
|--------|---|
| 692.80 | X |
|--------|---|

|      |     |
|------|-----|
| 1000 | 4.7 |
|------|-----|

$m = 4.82$

##### c.2 Para calcular el valor de $C$ de Iszkowsky

Del cuadro 1.4, obtendremos el valor de  $C$

$C = 0.12$

Reemplazando en la formula empírica obtenemos un caudal máximo de  $264.49 m^3/s$ .

## **8.6 Estimación de la pérdida de suelo con la EUPS (USLE)**

### a. Datos generales de la cuenca

Área de la cuenca:  $A = 692.80 \text{ km}^2$

Precipitación promedio:  $P = 660.06 \text{ mm/año}$

### b. Fórmula empírica

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

Donde:

$A$  = Erosión del suelo t/ha\*año.

$R$  = Erosividad media anual (MJ.mm/ha\*h\*año).

$K$  = Erosionabilidad del suelo.

$L.S$  = Factor topográfico formado por los factores, longitud de pendiente,  $L$  (m) y pendiente,  $S$  (grados).

$C$  = Factor de vegetación.

$P$  = Factor de prácticas mecánicas.

### c. Parámetros

#### c.1 Estimación del factor de erosividad media anual “R”

Para emplear los métodos a proponer se tiene los datos de precipitación media anual para el análisis del factor “R” en la cuenca de Yucaes, se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 8.27 Precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas del área de influencia de la cuenca de Yucaes

| Nº       | ESTACION    | ENE    | FEB    | MAR    | ABR   | MAY   | JUN  | JUL   | AGO   | SET   | OCT   | NOV   | DIC    | TOTAL  |
|----------|-------------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1        | Wayllapampa | 106.41 | 117.73 | 106.35 | 31.98 | 18.95 | 4.61 | 13.57 | 11.17 | 17.03 | 33.73 | 45.07 | 88.58  | 595.18 |
| 2        | Chontaca    | 135.96 | 132.89 | 125.08 | 62.12 | 15.52 | 7.87 | 17.65 | 13.53 | 24.36 | 57.86 | 55.63 | 93.18  | 741.63 |
| 3        | Allpachaca  | 116.39 | 152.45 | 153.66 | 36.46 | 19.09 | 4.68 | 12.98 | 14.47 | 25.82 | 45.25 | 54.84 | 123.90 | 759.99 |
| 4        | Pampas      | 108.23 | 104.91 | 99.76  | 40.50 | 7.72  | 1.98 | 5.87  | 6.87  | 13.45 | 30.78 | 64.04 | 121.60 | 605.69 |
| Promedio |             | 116.75 | 127.00 | 121.21 | 42.76 | 15.32 | 4.78 | 12.52 | 11.51 | 20.17 | 41.90 | 54.89 | 106.81 | 675.62 |

Fuente: Elaboración propia

#### - Cálculo del factor de erosividad “R” mediante la aplicación de métodos empíricos

##### ➤ Método propuesto por Cortés (1994)

$$R = Y = 2.4619 * P + 0.00606 * P^2$$

Donde:

$R$  = coeficiente de erosividad de Wischmeier

P = Precipitación media anual.

$$R = 4265.18 MJ * mm / (ha * h)$$

➤ Método propuesto por Lombardi Neto (1994)

De la fórmula:

$$R = 67.355 * \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.85}$$

Cuadro 8.28 Calculo del factor de erosividad "R" con la ecuación de Lombardi

| N°          | ESTACION    | ENE     | FEB     | MAR     | ABR    | MAY   | JUN  | JUL   | AGO   | SET   | OCT    | NOV    | DIC     | R       |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|--------|-------|------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|
| 1           | Wayllapampa | 823.74  | 978.20  | 822.95  | 106.71 | 43.84 | 3.96 | 24.85 | 17.85 | 36.56 | 116.83 | 191.19 | 603.10  | 3769.79 |
| 2           | Chontaca    | 1036.35 | 996.87  | 899.32  | 273.65 | 25.88 | 8.15 | 32.23 | 20.50 | 55.74 | 242.54 | 226.82 | 545.16  | 4363.22 |
| 3           | Allpachaca  | 779.36  | 1233.13 | 1249.75 | 108.32 | 36.08 | 3.31 | 18.72 | 22.51 | 60.27 | 156.38 | 216.86 | 866.71  | 4751.40 |
| 4           | Pampas      | 835.31  | 792.27  | 727.27  | 157.06 | 9.38  | 0.93 | 5.89  | 7.69  | 24.10 | 98.52  | 342.30 | 1018.16 | 4018.87 |
| PROMEDIO R: |             |         |         |         |        |       |      |       |       |       |        |        |         | 4225.82 |

Fuente: Elaboración propia

➤ Método propuesto por Fournier (1994)

$$125.59 * \sum \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0.603}$$

Cuadro 8.29 Calculo del factor de erosividad "R" con la ecuación de Fournier

| N°          | ESTACION    | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SET  | OCT  | NOV  | DIC  | R       |
|-------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| 1           | Wayllapampa | 5.91 | 6.67 | 5.90 | 1.39 | 0.74 | 0.13 | 0.49 | 0.39 | 0.65 | 1.48 | 2.10 | 4.74 | 3841.02 |
| 2           | Chontaca    | 6.95 | 6.76 | 6.29 | 2.70 | 0.51 | 0.22 | 0.59 | 0.43 | 0.87 | 2.48 | 2.37 | 4.41 | 4344.41 |
| 3           | Allpachaca  | 5.68 | 7.87 | 7.94 | 1.40 | 0.64 | 0.12 | 0.40 | 0.46 | 0.92 | 1.82 | 2.29 | 6.12 | 4479.67 |
| 4           | Pampas      | 5.97 | 5.75 | 5.41 | 1.82 | 0.25 | 0.05 | 0.18 | 0.21 | 0.48 | 1.31 | 3.17 | 6.87 | 3950.86 |
| Promedio R: |             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 4153.99 |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.30: Promedio del factor de erosividad "R"

| Métodos Empíricos | R (MJ*mm/(Ha*h) |
|-------------------|-----------------|
| Cortés            | 4265.18         |
| Lombardi Neto     | 4225.82         |
| Fornier           | 4153.99         |
| Promedio          | 4215.00         |

Fuente: Elaboración propia

## c.2 Estimación del factor de erodabilidad del suelo "K"

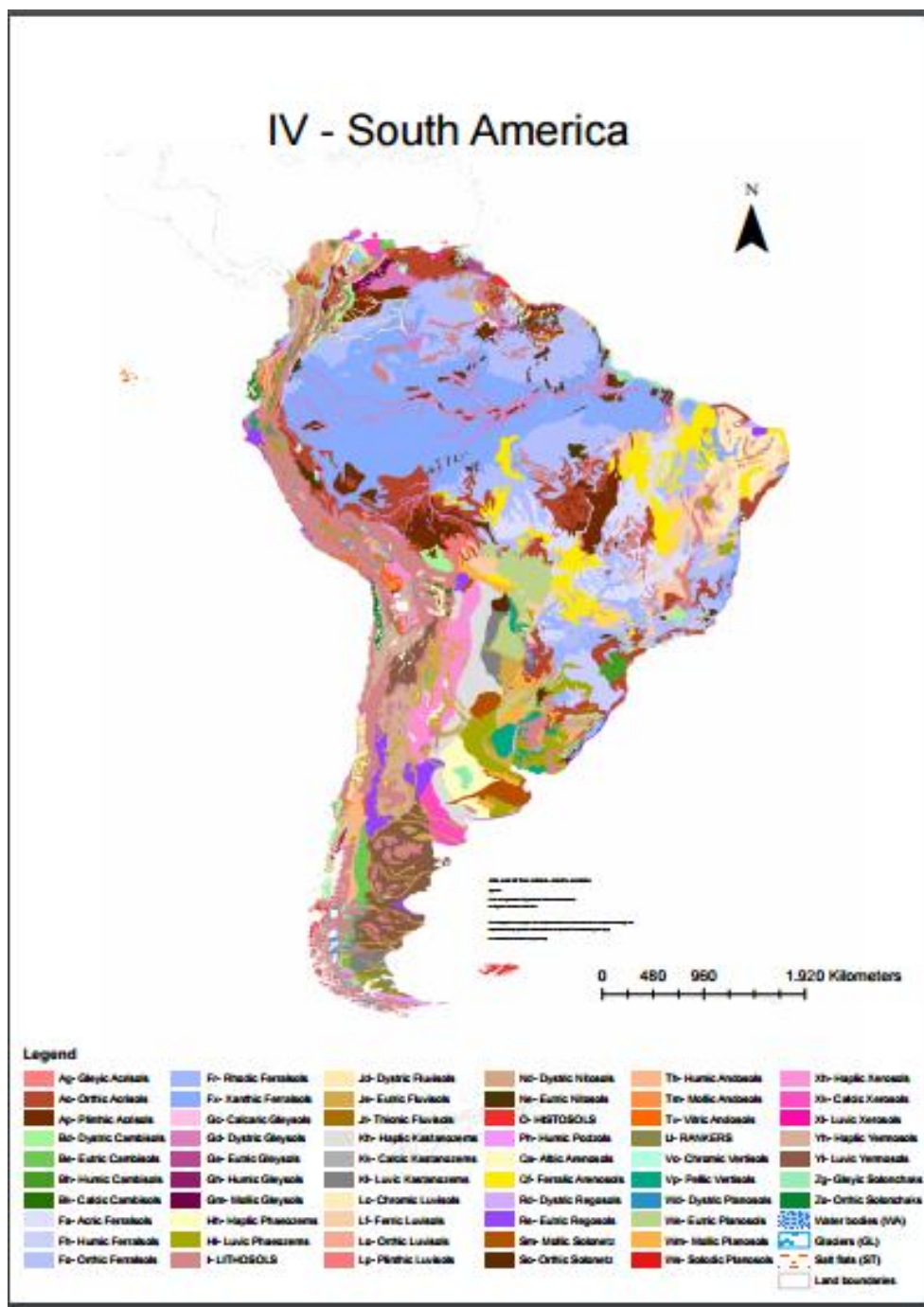


Figura 8.1 Mapa mundial de suelos IV – South América

Fuente: FAO (1978)

Se realiza el mapa de suelos de la cuenca del río Yucaes, con sus respectivas áreas, teniendo configurado dos tipos de suelos, se muestra en la figura 8.2 y tabla 8.1:

- Vitric andosols (Tv)
- Lithosols (I)

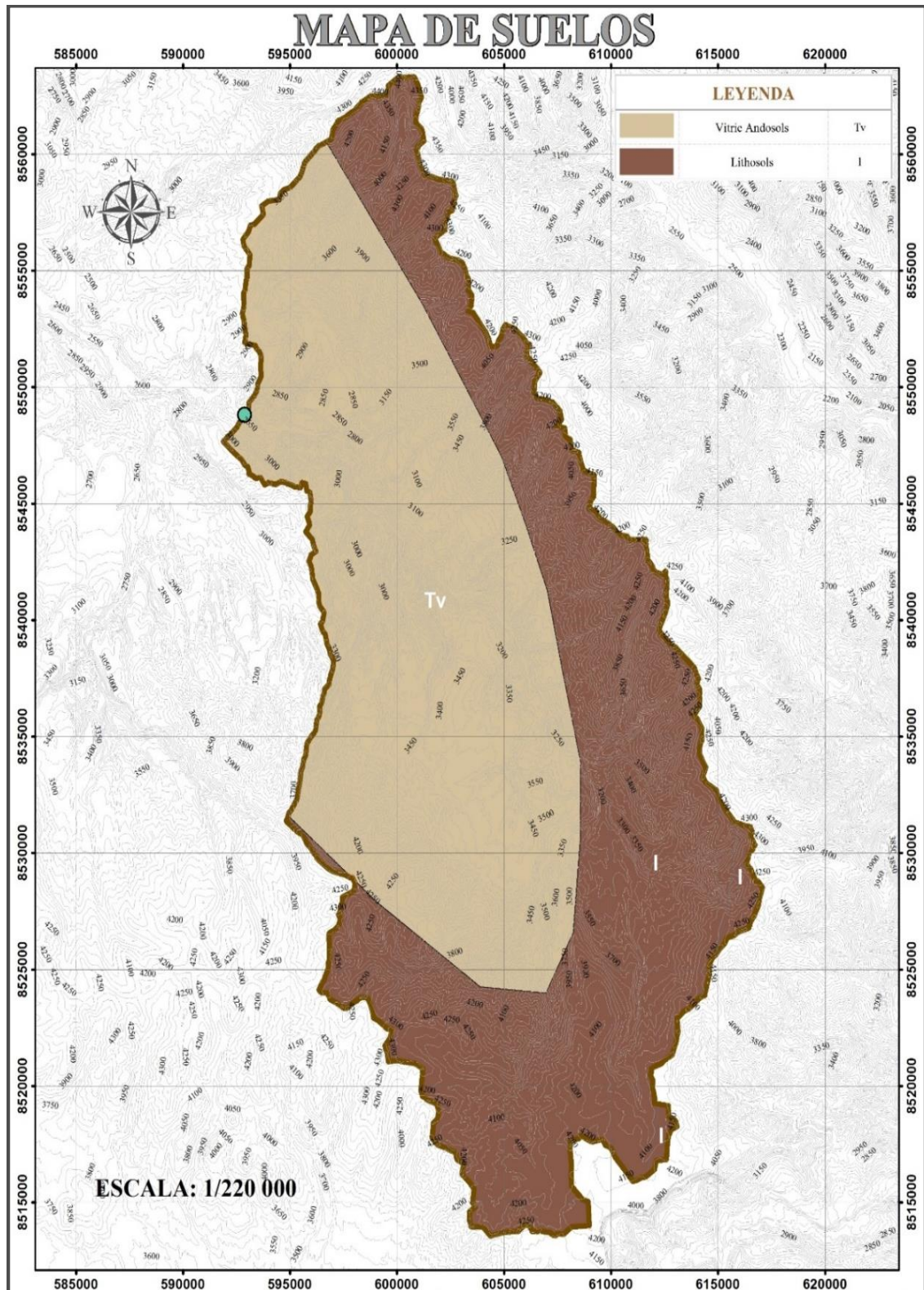


Figura 8.2 Mapa de suelos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.1 Características generales del suelo del mundo (FAO), para cálculo de susceptibilidad de erosión del suelo

| Soil<br>unit<br>symbol | sand %<br>topsoil | sand %<br>subsoil | silt %<br>topsoil | silt %<br>subsoil | clay %<br>topsoil | clay %<br>subsoil | pH<br>water<br>topsoil | pH<br>water<br>subsoil | OC %<br>topsoil | OC %<br>subsoil | N %<br>topsoil | N %<br>subsoil | BS %<br>topsoil | BS %<br>subsoil | CEC<br>topsoil | CEC<br>subsoil | CEC<br>clay<br>topsoil | CEC<br>Clay<br>subsoil | CaCO3<br>%<br>topsoil | CaCO3<br>%<br>subsoil | BD<br>topsoil | BD<br>subsoil | C/N<br>topsoil | C/N<br>subsoil |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| HL                     | 39.1              | 46.9              | 26.5              | 20.7              | 34.6              | 32.4              | 6.4                    | 6.6                    | 1.46            | 0.63            | 0.13           | 0.07           | 83              | 89              | 20.4           | 15.8           | 54                     | 43                     | 0.4                   | 0.7                   | 1.3           | 1.3           | 13             | 9              |
| HL 1                   | 75                | 70                | 15                | 10                | 10                | 20                | 6.4                    | 6.6                    | 1.5             | 0.5             | 0.13           | 0.06           | 83              | 89              | 10             | 15             | 75                     | 73                     | 0                     | 0                     | 1.4           | 1.5           | 12             | 9              |
| HL 2                   | 43.5              | 53.4              | 31.2              | 27.8              | 25.5              | 18.8              | 6.6                    | 6.8                    | 1.23            | 0.52            | 0.1            | 0.03           | 87              | 95              | 17.8           | 12.1           | 68                     | 52                     | 0                     | 0.8                   | 1.4           | 1.4           | 10             | 7              |
| HL 3                   | 33.2              | 38.3              | 20.2              | 11.2              | 46.6              | 50.5              | 6.4                    | 6.6                    | 1.8             | 0.75            | 0.14           | 0.1            | 73              | 79              | 23.3           | 16.7           | 34                     | 29                     | 0.9                   | 0.8                   | 1.3           | 1.3           | 15             | 10             |
| I                      | 58.9              | 56                | 16.2              | 17                | 24.9              | 27                | 7.1                    | 7.2                    | 0.97            | 0.4             | 0.13           | 0.02           | 69              | 90              | 10.4           | 8              | 55                     | 28                     | 0.1                   | 0.5                   | 1.2           | 1.5           | 11             | 8              |
| I 1                    | 75                | 72                | 15                | 16                | 10                | 12                | 8.3                    | 8.3                    | 0.31            | 0.2             | 0.01           | 0              | 98              | 100             | 7.9            | 8              | 69                     | 66                     | 0.1                   | 0.5                   | 1.3           | 1.5           | 12             | 9              |
| I 2                    | 65                | 62                | 15                | 16                | 20                | 22                | 7                      | 7.2                    | 1               | 0.4             | 0.09           | 0.05           | 80              | 90              | 13             | 15             | 62                     | 67                     | 0.3                   | 0.5                   | 1.2           | 1.5           | 11             | 8              |
| I 3                    | 55                | 52                | 15                | 16                | 30                | 32                | 4.8                    | 5.5                    | 2.3             | 0.8             | 0.25           | 0.1            | 11              | 60              | 15.4           | 15             | 27                     | 44                     | 0                     | 0                     | 1.4           | 1.6           | 9              | 8              |
| J                      | 55.8              | 52.7              | 22.2              | 23.5              | 22                | 23.8              | 6.3                    | 6.3                    | 1.32            | 0.81            | 0.19           | 0.1            | 82              | 84              | 14.8           | 15             | 55                     | 58                     | 1.5                   | 2.4                   | 1.3           | 1.2           | 12             | 13             |
| JC                     | 39.6              | 41.7              | 39.9              | 39.8              | 20.6              | 18.5              | 8                      | 8.1                    | 0.65            | 0.24            | 0.08           | 0.02           | 99              | 99              | 17.7           | 15.8           | 52                     | 42                     | 10.1                  | 11.6                  | 1.5           | 1.4           | 10             | 11             |
| JC 1                   | 68.9              | 62.9              | 16.7              | 20.1              | 14.4              | 17                | 8                      | 8.2                    | 0.28            | 0.11            | 0.03           | 0.01           | 97              | 94              | 5.5            | 4.2            | 48                     | 25                     | 0.7                   | 3.3                   | 1.6           | 1.6           | 10             | 10             |
| JC 2                   | 20.9              | 36.4              | 54                | 44.8              | 25.2              | 18.9              | 8                      | 8.1                    | 0.84            | 0.27            | 0.08           | 0.02           | 100             | 100             | 23.8           | 18.8           | 56                     | 50                     | 14.8                  | 13.7                  | 1.4           | 1.3           | 10             | 11             |
| JC 3                   | 10                | 10                | 50                | 50                | 40                | 40                | 8                      | 8.2                    | 0.9             | 0.3             | 0.09           | 0.03           | 100             | 100             | 25             | 20             | 59                     | 49                     | 15                    | 20                    | 1.4           | 1.4           | 10             | 10             |
| TO                     | 38.2              | 41.6              | 36.6              | 35                | 25.2              | 23.5              | 6                      | 6.4                    | 3.02            | 1.08            | 0.31           | 0.14           | 60              | 58              | 23.1           | 20.2           | 27                     | 23                     | 1                     | 1                     | 0.9           | 0.9           | 11             | 11             |
| TO 1                   | 45                | 50                | 50                | 45                | 5                 | 5                 | 6                      | 6.4                    | 2.5             | 1               | 0.23           | 0.09           | 60              | 58              | 11             | 5              | 40                     | 30                     | 1                     | 1                     | 1             | 1.1           | 11             | 11             |
| TO 2                   | 43.5              | 48.1              | 41.1              | 39                | 15.5              | 12.9              | 6.4                    | 6.8                    | 3.31            | 1.15            | 0.34           | 0.16           | 69              | 67              | 23.8           | 20.7           | 30                     | 25                     | 1.3                   | 1.3                   | 0.9           | 0.9           | 11             | 12             |
| TO 3                   | 12                | 9.1               | 14                | 14.7              | 74                | 76.1              | 4.3                    | 4.5                    | 1.57            | 0.74            | 0.17           | 0.08           | 14              | 12              | 19.6           | 17.6           | 27                     | 23                     | 0                     | 0                     | 0.9           | 0.9           | 9              | 9              |
| TV                     | 64.5              | 67                | 26.2              | 26.3              | 9.3               | 6.7               | 6.3                    | 6.5                    | 1.4             | 0.84            | 0.27           | 0.16           | 53              | 64              | 15.2           | 13.9           | 75                     | 60                     | 0                     | 0                     | 1.1           | 1.1           | 11             | 10             |
| TV 1                   | 75.5              | 69                | 19.5              | 25.5              | 5                 | 5.6               | 6.5                    | 6.5                    | 0.87            | 0.38            | 0.09           | 0.04           | 72              | 83              | 5.9            | 4.6            | 75                     | 60                     | 0                     | 0                     | 1.2           | 1.3           | 12             | 11             |
| TV 2                   | 42.5              | 63                | 39.7              | 27.9              | 18                | 9.1               | 5.8                    | 6.3                    | 2.3             | 0.74            | 0.56           | 0.32           | 27              | 32              | 26.4           | 23.3           | 75                     | 60                     | 0                     | 0                     | 1             | 0.9           | 8              | 8              |
| TV 3                   | 40                | 50                | 35                | 30                | 25                | 20                | 5.8                    | 6.3                    | 3               | 1               | 0.3            | 0.33           | 27              | 32              | 29             | 16             | 75                     | 60                     | 0                     | 0                     | 0.8           | 0.9           | 10             | 9              |

Fuente: FAO (1978)

Con la información del uso del mapa mundial de suelos IV – South América, el mapa de suelos, Características generales del suelo del mundo (FAO), para cálculo de susceptibilidad de erosión del suelo, se determina el factor K de erodabilidad del suelo con el nomograma de Wischmeier y Smith (1978).

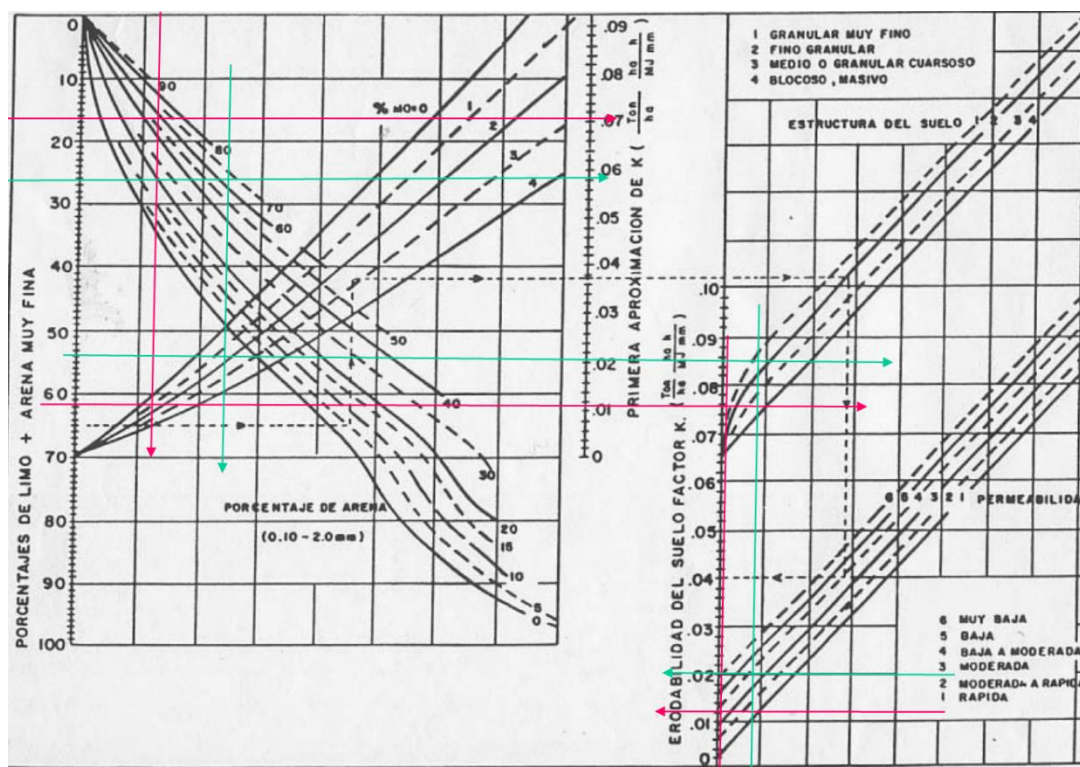


Gráfico 8.5 Nomograma para el cálculo del factor de erodabilidad de los suelo (K) en el sistema internacional (S.I)

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

Así tenemos:

|                                     |      |      |   |
|-------------------------------------|------|------|---|
| Porcentaje de limo + arena muy fina | 26.2 | 16.2 | % |
| Arena                               | 64.5 | 59.0 |   |
| Materia Orgánica                    | 1.4  | 0.97 |   |
| Estructura Granular del suelo       | 2.0  | 2.0  |   |
| Permeabilidad del Suelo             | 3.0  | 3.0  |   |

Cuadro 8.31 Promedio del factor de erodabilidad "K"

| Características         | Sand<br>Topsoil<br>%<br>Arena | Silt<br>Topsoil<br>%<br>Limo | OC<br>Topsoil<br>%<br>MO | Área<br>km <sup>2</sup> | K      | K promedio   |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------|--------------|
| Vitric<br>Andosols (Tv) | 64.5                          | 26.2                         | 1.4                      | 368.96                  | 0.0202 | 7.453        |
| Lithosols (l)           | 59                            | 16.2                         | 0.97                     | 323.84                  | 0.0102 | 3.303        |
|                         |                               |                              |                          | 692.80                  |        | <b>0.016</b> |

Fuente: Elaboración propia

Luego, obtenemos el factor de erodabilidad promedio:

$$K_{\text{Promedio}} = 0.016 \text{ Ton} * ha * h / ha * MJ * mm$$

### c.3 Estimación del factor topográfico "L.S"

$$LS = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.5} * [0.065 + 0.0454 * S + 0.00065 * S^2]^t$$

Donde:

LS = Factor de grado y longitud de la pendiente.

$\lambda$  = Longitud de la pendiente.

S = Pendiente media del terreno.

Longitud de la pendiente : 54550 m

Cota Inicial (Hi) : 2550 msnm

Cota Final (Hf) : 4450 msnm

Pendiente (S) : 3.48 %

Exponente del largo de la pendiente (m) : 0.40

Luego, obtenemos el factor topográfico promedio:

$$LS = 5.255$$

### c.4 Estimación del factor de vegetación "C"

Área de la cuenca : A = 692.80 km<sup>2</sup>

Área de Ayacucho : A = 44181.04 km<sup>2</sup>

Para determinar los valores del factor C, se utilizara la tabla 1.2 y 1.3

Cuadro 8.32 Cálculo del factor de cobertura "C"

| Cultivos                    |                 | Cultivos en limpio | Cultivos permanentes | Pastos   | Producción forestal | Protección |             |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------|---------------------|------------|-------------|
| <b>Factor C</b>             |                 | 0.50               | 0.375                | 0.20     | 0.10                | 0.25       |             |
| <b>Áreas km<sup>2</sup></b> | <b>Ayacucho</b> | 1400.00            | 30.00                | 11300.00 | 1550.00             | 29901.04   |             |
|                             | <b>Yucaes</b>   | 21.95              | 0.47                 | 177.19   | 24.31               | 468.88     |             |
| <b>Ha</b>                   |                 | 2195.33            | 47.04                | 17719.46 | 2430.54             | 46887.63   | 69280.00    |
| <b>Factor C Ponderado</b>   |                 |                    |                      |          |                     |            | <b>0.24</b> |

Fuente: Elaboración propia

### c.5 Estimación del factor de prácticas mecánicas "P"

Área de la cuenca :  $A = 692.80 \text{ km}^2$

Área de Ayacucho :  $A = 44181.04 \text{ km}^2$

Para determinar los valores del factor P, se utilizara la tabla 1.4

Cuadro 8.33 Cálculo del factor de prácticas de conservación "P"

| Cultivos                    |                 | Cultivos en limpio | Cultivos permanentes | Pastos   | Producción forestal | Protección |             |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------|---------------------|------------|-------------|
| <b>Factor P</b>             |                 | 0.50               | 0.50                 | 1.00     | 0.80                | 0.80       |             |
| <b>Áreas km<sup>2</sup></b> | <b>Ayacucho</b> | 1400.00            | 30.00                | 11300.00 | 1550.00             | 29901.04   |             |
|                             | <b>Yucaes</b>   | 21.95              | 0.47                 | 177.19   | 24.31               | 468.88     |             |
| <b>Ha</b>                   |                 | 2195.33            | 47.04                | 17719.46 | 2430.54             | 46887.63   | 69280.00    |
| <b>Factor P Ponderado</b>   |                 |                    |                      |          |                     |            | <b>0.84</b> |

Fuente: Elaboración propia

### d. Cálculo de la erosión hídrica potencial y actual

En el cuadro 8.34 se muestra los resultados de cada factor del modelo USLE, empleado para la cuenca en estudio.

Cuadro 8.34 Resumen de los factores del modelo USLE

| <b>Factores</b>                                 | <b>Resultados</b> |
|-------------------------------------------------|-------------------|
| Erosividad "R"                                  | 4215.00           |
| Erodabilidad "k"                                | 0.016             |
| Factor de Grado y Longitud de la Pendiente "LS" | 5.255             |
| Vegetación "C"                                  | 0.240             |
| Prácticas Mecánicas "P"                         | 0.840             |

Fuente: Elaboración propia

**d.1 Estimación de la erosión potencial “A<sub>p</sub>”**

$$A_p = R * K * L.S$$

$$A_p = 354.40 \text{ Ton/ha} * \text{año} \quad (\text{Muy alta la erosión})$$

**d.2 Estimación de la erosión actual “A<sub>a</sub>”**

$$A_a = R * K * L.S * C * P$$

$$A_p = 71.45 \text{ Ton/ha} * \text{año} \quad (\text{Muy alta la erosión})$$

## **8.7 Prueba de infiltración del suelo**

### 8.7.1 La infiltración

La infiltración del agua posee un rol fundamental en los procesos de escorrentía como respuesta a una precipitación dada en una cuenca, dependiendo de su magnitud de lluvias y sus intensidades, pueden producir caudales diferentes. Así también, el estudio de la recarga de acuíferos. La infiltración depende de muchos factores, por lo que su estimación confiable es bastante difícil y es imposible obtener una relación única entre todos los parámetros que la condicionan.

En este sentido, el proceso de infiltración de agua en el suelo ha sido intensamente estudiado debido a su importancia en el manejo del agua en la agricultura, la conservación del recurso suelo y otras actividades silvoagropecuarias.

Por otra parte, la velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión hídrica. En casi todos los métodos de riego la velocidad de entrada de agua al suelo determina los tiempos de riego y los diseños de los sistemas en cuanto al tamaño de las unidades superficiales y los caudales a utilizar. Esta velocidad puede determinarse por distintos métodos como: el caudal de ingreso y salida en un surco (método del surco), las pozas de infiltración y el método del cilindro infiltrómetro (de carga constante y variable). El método a emplear está en función de las condiciones del lugar de la prueba, de los materiales y del equipo disponible. Además, el proceso de infiltración es de gran importancia práctica dado que su velocidad determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento, pudiendo detectarse así el peligro de erosión durante inundaciones a lluvias muy intensas. La importancia de obtener el modelo matemático de la velocidad de infiltración es para realizar el diseño, generalmente de los métodos de riego por gravedad y presurizado, el cálculo del tiempo de riego, la longitud del surco, etc. Así como puede determinarse la cantidad de agua que puede infiltrarse en la cuenca y estimar la escorrentía superficial. La velocidad de infiltración es también importante para el diseño de algunas estructuras de protección como es el caso de las zanjas de infiltración. En general, la importancia de esta variable es fundamental para el diseño de los sistemas de riego, en especial de los métodos de riego presurizados.

#### 8.7.1.1 Movimiento del agua

**Infiltración:** Movimiento descendente del agua cuando el suelo no está saturado “seco”, el flujo es vertical.

**Percolación:** Atravesar las aguas con movimiento lento (cuando el suelo ya está saturado), en material poroso saturado. No influye el gradiente de humedad.

**Permeabilidad:** Estado físico del suelo que permite la penetración de los agentes atmosféricos y principalmente el agua. Sí influye el gradiente de humedad. El flujo es horizontal.

#### 8.7.1.2 Descripción del proceso de la infiltración

El agua penetra al suelo, normalmente, desde la superficie. El proceso de entrada de agua al suelo se conoce con el nombre de **infiltración**. Inicialmente este proceso es rápido, para disminuir paulatinamente en el tiempo. Este hecho queda reflejado en que inicialmente toda el agua que se aplica sobre el suelo es absorbida, pero después de un cierto tiempo el agua se apoza y comienza a escurrir por efecto de la fuerza de gravedad, si el suelo presenta pendiente.

Infiltración es el flujo del agua desde la superficie del suelo hacia las zonas de raíces en primer lugar y posteriormente hacia las capas más profundas, mientras dura el aporte de agua. El agua penetra en el suelo por los poros, grietas u orificios entre partículas y agregados del mismo. Se produce un frente de humedecimiento del terreno que inicialmente avanza con gran velocidad, velocidad que suele ir disminuyendo con el paso del tiempo.

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores, se muestra en la figura 8.3.

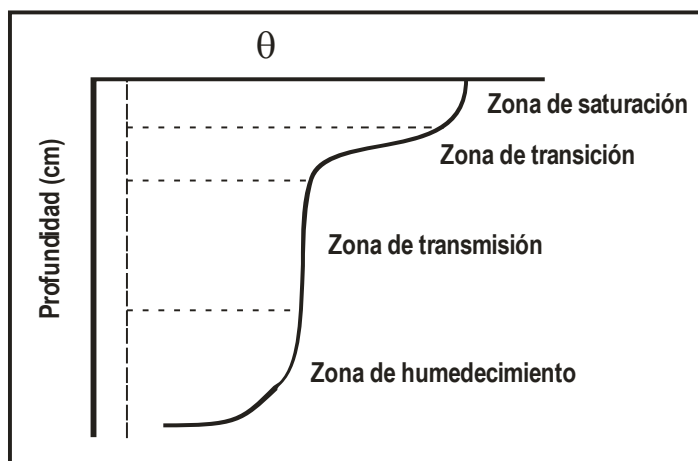


Figura 8.3 Perfil de humedad en el proceso de infiltración

Fuente: Pizarro (manual de conservación de aguas y suelos)

Si se aplica agua a determinada superficie de suelo, a una velocidad que se incrementa en forma uniforme, tarde o temprano se llega a un punto en que la velocidad de aporte comienza a exceder la capacidad del suelo para absorber agua y, el exceso se acumula sobre la superficie, o escurre si las condiciones de pendiente lo permiten.

La capacidad de infiltración conocida también como “infiltrabilidad del suelo” es el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a la presión atmosférica. Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la infiltrabilidad, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada y la velocidad de aporte determina la velocidad de infiltración. Sin embargo, una vez que la velocidad de aporte excede la infiltrabilidad del suelo es ésta última la que determina la velocidad real de infiltración; de ese modo el proceso es controlado por las características del perfil; Gurovich (1985).

En este contexto, la infiltración acumulada, es la integración en el tiempo de la velocidad de infiltración, con una dependencia curvilínea del tiempo y una pendiente que decrece gradualmente. La infiltrabilidad del suelo y su variación en el tiempo dependen del contenido de agua inicial y de la succión, así como de la textura, estructura y uniformidad (o secuencia de los estratos) del perfil del suelo.

Por otra parte, la relación matemática que existe entre la velocidad de infiltración y el tiempo está representada por una función exponencial inversa. Así también, cada cambio en las características del suelo provocará instantáneamente un comportamiento singular del proceso de infiltración, que obviamente se verá reflejado en una gráfica de estas variables. De esta manera, es posible visualizar una familia de curvas de infiltración para cada tipo de suelo.

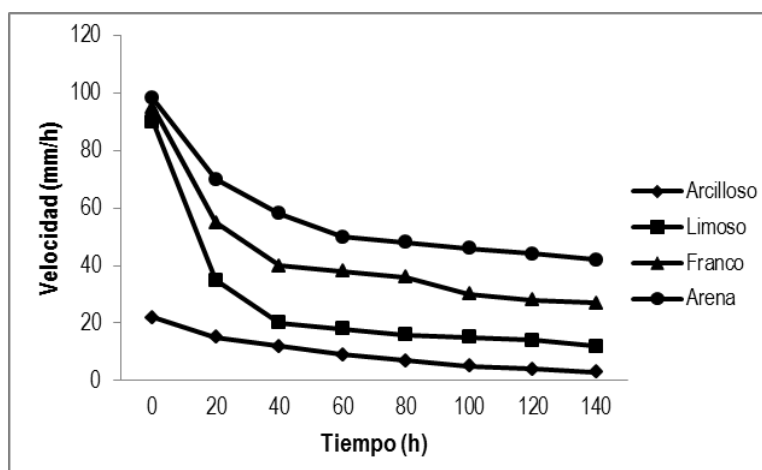


Gráfico 8.6 Curvas de infiltración, según textura del suelo

Fuente: Pizarro (manual de conservación de aguas y suelos)

### 8.7.1.3 Conceptos relacionados a la infiltración

#### 1. Velocidad de infiltración

Se refiere a la velocidad con que el agua penetra al suelo y se expresa en términos de mm/h, cm/h., mm/min.

La velocidad de infiltración de un suelo depende de factores los siguientes factores:

- ✓ Textura del suelo: La textura determina el tamaño de poros. Un suelo arenoso presenta una velocidad de infiltración mayor que uno arcilloso.
- ✓ Estructura del suelo: La estructura determina la distribución de los poros. Un suelo con estructura granular tendrá una velocidad de infiltración mayor que el suelo que presente una estructura laminar.
- ✓ Calidad del agua de riego: Si el agua de riego presenta una composición relativamente mayor en Na que Ca y Mg, se producirá una dispersión de las partículas del suelo debido al Na (menos poros), lo que disminuirá la velocidad de infiltración.

- ✓ Compactación del suelo: En un suelo compactado la velocidad de infiltración es menor que en un suelo no compactado.
- ✓ Contenido de agua del suelo: A mayor contenido de agua del suelo menor es la velocidad de infiltración.
- ✓ Sólidos en suspensión: Si el agua contiene sólidos en suspensión, éstos forma sobre la superficie del suelo una costra impermeable al paso del agua por lo que la velocidad de infiltración es menor.

En el gráfico 8.7, se presenta el comportamiento de la velocidad de infiltración en suelos de diferentes texturas.

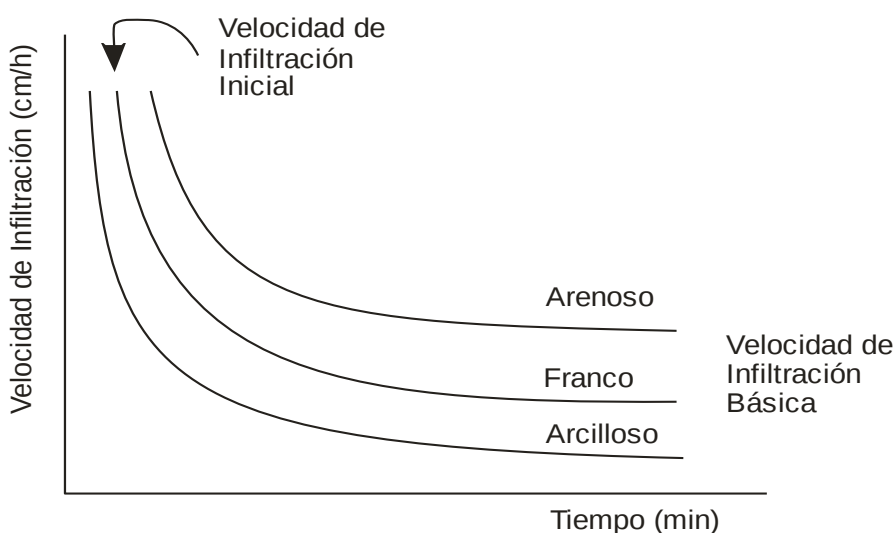


Gráfico 8.7 Curva de velocidad de infiltración para tres tipos de suelos

Fuente: Pizarro (manual de conservación de aguas y suelos)

Los suelos de texturas gruesas presentan una velocidad de infiltración, más alta que los de suelos de texturas más finas, lo cual indica que para hacer penetrar una determinada lámina de agua, el tiempo de aplicación del agua será mayor en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso.

## 2. Velocidad de infiltración instantánea (I)

Llamada simplemente velocidad de infiltración, puede ser definida como la velocidad de entrada vertical del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno se cubre con una lámina delgada de agua.

La función que describe la velocidad de infiltración es un punto cualquiera, es un modelo exponencial de la forma:

$$I = a * T_o^{-b}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración expresada en mm/h, cm/h, etc.

T<sub>o</sub> = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo). Expresado en minutos u horas.

a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para: T<sub>o</sub>= 1.0 min.

b = Exponencial que varía entre 0 a -1.

### 3. Velocidad de infiltración básica (I<sub>b</sub>)

Inicialmente, al aplicar agua, el valor de infiltración es alto, y a medida que se incrementa el contenido de agua del suelo disminuye paulatinamente, hasta llegar a un valor constante, denominado **velocidad de infiltración básica**.

Llamado infiltración básica, es el valor instantáneo, cuando la velocidad de infiltración es menor o igual que el 10% de su valor.

$$I_b = a * (T_b)^b$$

El tiempo al cual se logra la (I<sub>b</sub>) se obtiene mediante:

T<sub>b</sub> = - 10 b en horas.

T<sub>b</sub> = - 600 b en minutos.

Cuadro 8.35 Infiltración básica según tipo de suelo

| Tipo de suelo      | mm/h    |
|--------------------|---------|
| Arenoso grueso     | 25 a 60 |
| Arenoso fino       | 18 a 25 |
| Franco arenoso     | 14 a 18 |
| Franco limoso      | 10 a 14 |
| Franco arcilloso   | 7 a 10  |
| Arcillo limoso     | 4 a 7   |
| Arcilloso compacto | 2 a 5   |

Fuente: Pizarro (2004). Manual de conservación de aguas y suelos

Cuadro 8.36 Rangos de velocidad de infiltración básica de los diferentes tipos de suelos

| Tipo de suelo    | mm/h      |
|------------------|-----------|
| Arenoso          | Más de 30 |
| Franco arenoso   | 20 a 30   |
| Franco           | 10 a 20   |
| Franco arcilloso | 5 a 10    |
| Arcillo          | 1 a 5     |

Fuente: Brouwer et al (1988)

La infiltración básica sirve fundamentalmente para determinar el tipo de suelo y para elegir el tipo de emisor en los sistemas de riego presurizado.

#### 4. Velocidad de infiltración promedio (Ip)

También conocido como infiltración promedio, es la relación entre la infiltración acumulada o lámina de infiltración acumulada (Iac) y el tiempo acumulado (To):

$$I_p = \frac{I_{ac}}{T_o}$$

$$I_p = A * T_o^b$$

#### 5. Infiltración acumulada

El segundo término que define la infiltración de un suelo es la infiltración acumulada, que se refiere a la cantidad total de agua que penetra al suelo en función del tiempo. La infiltración acumulada está íntimamente relacionada con la velocidad de infiltración (I) que presente el suelo, ya que a mayor velocidad de infiltración mayor infiltración acumulada (gráfico 8.8).

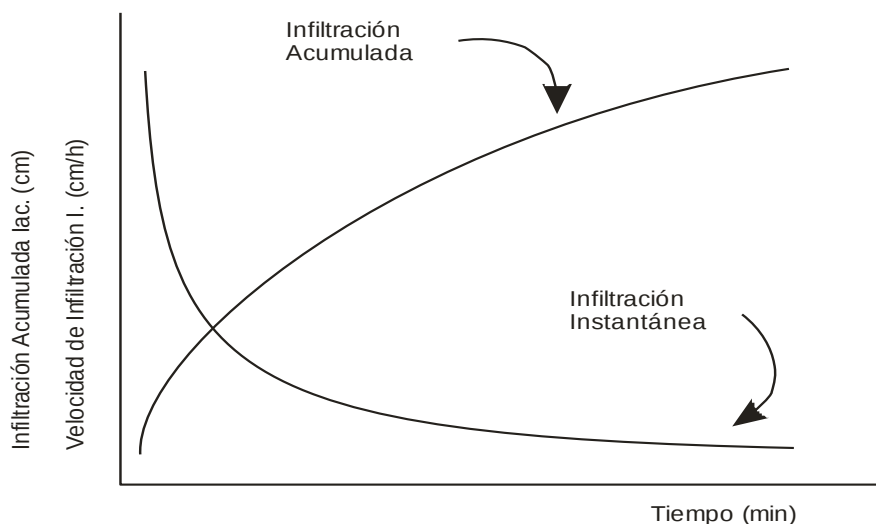


Gráfico 8.8 Velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada

Fuente: Pizarro (manual de conservación de aguas y suelos)

Las características de la infiltración de agua en un suelo nos darán una guía sobre cómo manejar el riego, modificando el tiempo de aplicación de agua (tiempo de riego) de acuerdo a la capacidad del suelo de absorber agua, para evitar que ésta se acumule en la superficie y se produzcan pérdidas por escurrimiento superficial.

La infiltración acumulada o lámina infiltrada acumulada ( $I_{ac}$ ), se expresa en forma exponencial de la siguiente forma:

$$I_{ac} = A * T_o^B$$

#### 8.7.1.4 Métodos para medir la velocidad de infiltración

Para medir la velocidad de infiltración, existen varios métodos, entre ellos:

- ❖ Método de surcos infiltrómetros.
- ❖ Rociadores.
- ❖ Método de represa o poceta.
- ❖ Método del Cilindro Infiltrómetro.

Independiente de la utilidad práctica de cada uno de ellos, los cilindros infiltrómetros han sido más recurrentemente utilizados, ya que requieren de menos equipos y materiales, y son más fáciles de instalar y operar.

### **Los cilindros infiltrómetros**

Los materiales y los equipos que se necesitan para la prueba de infiltración por el método de los cilindros infiltrómetros son los siguientes:

- Juego de dos cilindros infiltrómetros de acero o fierro galvanizado de 2 mm de espesor, de 30 y 50 cm de diámetro para los cilindros interior y exterior respectivamente y cuyas alturas son de 29 y 20 cm respectivamente.
- Una regla graduada o escalímetro.
- Cinta adhesiva o ganchos sujetadores de la regla graduada.
- Cronómetro.
- Comba y Tablones de madera.
- Nivel de carpintero.
- Lámina de plástico.
- Baldes o latas.
- Hojas de registros, Lapiceros y tizas.
- Gancho metálico, medidor del nivel del agua y/o flexómetro.

### **Proceso de instalación y operación**

La metodología que se siguió en el presente trabajo fue el siguiente:

#### **1. Selección y descripción del lugar**

Las pruebas se realizan en lugares representativos del terreno del cual se quiere conocer las características de infiltración. Además se determina las características físicas, textura, estructura, densidad aparente y el contenido de humedad, anotando si el suelo ha sido cultivado, cosechado recientemente, tipo de cultivos, presencia de costras, etc. Anotar también la información solicitada en el formato de ensayo.

#### **2. Instalación de los cilindros**

Introducir el cilindro exterior en el lugar seleccionado, mediante el uso de una comba sobre el tablón de madera que se coloca sobre el cilindro. El cilindro exterior se introduce unos 10 cm aproximadamente, luego se introduce el cilindro interior unos 15 cm.

La introducción de los cilindros debe efectuarse verticalmente a fin de evitar que se alteren sustancialmente las condiciones de la superficie del suelo.

Una vez instalado los cilindros, se remueve con cuidado el suelo que se encuentra adyacente a las paredes de estos y se coloca la regla graduada, fijándola adecuadamente en la parte interna del cilindro interior. En la instalación observar que los cilindros queden verticalmente, en la parte horizontal, un nivel de carpintero puede ser utilizado para hacer estas verificaciones. Luego se extiende la lámina o manto de plástico sobre la superficie del suelo del cilindro interior.

### **3. Llenado de los cilindros**

Luego de colocado el plástico en el cilindro interior, se procede a su llenado con agua, hasta aproximadamente una lámina de 10 a 15 cm. El agua debe ser aplicada primero al cilindro exterior y luego inmediatamente al cilindro interior, siendo preferible que simultáneamente sean llenados ambos cilindros, lo cual requiere que dos personas operen juntas. Llenados los cilindros, se procede a retirar el plástico del cilindro interior, para iniciar inmediatamente la lectura de la carga de agua.

El agua entre los cilindros es para tratar de anular la infiltración lateral que pueda presentarse en el cilindro interior. El nivel de agua en el cilindro interior y exterior debe ser aproximadamente lo mismo.

### **4. Lectura del nivel de agua**

Retirada el plástico del cilindro, se procede a efectuar las lecturas del nivel de agua en el cilindro interior, dicho nivel se medirá con el escalímetro o regla graduada previamente instalada y el gancho metálico.

Las mediciones normalmente se continuarán con un intervalo de tiempo determinado, siendo el inicio de estos intervalos de 1 a 2 minutos aprox., luego irán distanciados cada 5, 10, 15, 20, 30 min., hasta finalmente completar la prueba.

Cuando en los cilindros se ha infiltrado una lámina de alrededor de 2.5 a 3 cm, se procede a llenar nuevamente, procurando alcanzar el mismo nivel inicial. Esta operación debe ser hecha rápidamente, para el cual debe efectuarse una lectura antes e inmediatamente después del llenado a fin de que el tiempo transcurrido en esta

operación sea considerado “cero”. La duración de la prueba no debe ser menor de dos horas.

En los suelos francos y arcillosos, la duración debe ser de 3 a 5 horas.

En general se indica que la duración de la prueba debe ser hasta que la tasa de infiltración sea sensiblemente constante (alcanzar la infiltración básica).

## **5. Cálculo de registros y datos**

Los datos de campo se anotarán en las columnas (1) y (4) del formato de registro.

Con base a los datos de campo tomados, se procede al llenado del resto de las columnas del referido cuadro.

- Registrar los datos de tiempo parcial y lámina parcial.
- Calcular la velocidad de infiltración instantánea y lámina acumulada para cada período de tiempo transcurrido.

## **6. Evaluación de los datos de infiltración**

- Efectuar un diagrama de Lámina infiltrada Acumulada, versus tiempo acumulado y trazar la curva de mayor ajuste (escala normal y logarítmica). Determinar la función matemática respectiva y su coeficiente de determinación ( $r^2$ ).
- Elaborar el diagrama de la velocidad de infiltración instantánea y trazar la curva de mayor ajuste (escala normal y logarítmica). Determinar su función matemática y su coeficiente de determinación respectivo.
- Calcular las otras funciones de la velocidad de infiltración promedio y obtención de la velocidad de infiltración básica y el tiempo a la cual se produce.

## **7. Determinación de los parámetros de la función matemática**

La determinación de los parámetros de la función de la velocidad de infiltración y de la lámina de infiltración acumulada, puede realizarse mediante el Método gráfico y el Método analítico, para lo cual se utiliza la información de campo obtenida: velocidad de infiltración (cm/h) y tiempo.

El Método analítico, con la información de campo obtenida en la prueba de infiltración y previamente el cuadro (formato) procesado, se realiza el cálculo de los parámetros

de la función de la velocidad de infiltración, mediante el Método de los Mínimos Cuadrados.

Determinación de la Velocidad de Infiltración por el Método de los Cilindros Infiltrómetros.

### 8.7.2 Cálculos y resultados

#### a. Registro de los datos de campo en el formato 01

La prueba de infiltración se realizó con el método de cilindros infiltrómetros.

Cuadro 8.37 Prueba de infiltración y registro de datos

|                   |                                    |                        |                              |
|-------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| <b>Proyecto :</b> | Estimación de la erosión hídrica   | <b>Observador :</b>    | Sta. Violeta<br>Saccatoma C. |
| <b>Fecha :</b>    | 09/11/17                           | <b>Nº de prueba :</b>  | 1                            |
| <b>Método :</b>   | Método de cilindros infiltrómetros | <b>Observaciones :</b> | Borde del<br>campo           |

| HORA<br>(hh:mm) | Tiempo (min) |           | Lámina infiltrada<br>(cm) |           | Velocidad de Infiltración<br>(cm/h) |          |
|-----------------|--------------|-----------|---------------------------|-----------|-------------------------------------|----------|
|                 | Parcial      | Acumulado | Parcial                   | Acumulada | Instantánea                         | Promedio |
| 08:05 a.m.      | 0            | 0         | -----                     | -----     | -----                               | -----    |
| 08:06 a.m.      | 1            | 1         | 1.05                      | 1.05      | 63                                  | 63       |
| 08:07 a.m.      | 1            | 2         | 0.87                      | 1.92      | 52.2                                | 57.60    |
| 08:08 a.m.      | 1            | 3         | 0.57                      | 2.49      | 34.2                                | 49.80    |
| 08:09 a.m.      | 1            | 4         | 0.54                      | 3.03      | 32.4                                | 45.45    |
| 08:10 a.m.      | 1            | 5         | 0.35                      | 3.38      | 21                                  | 40.56    |
| 08:11 a.m.      | 1            | 6         | 0.25                      | 3.63      | 15                                  | 36.30    |
| 08:13 a.m.      | 2            | 8         | 0.39                      | 4.02      | 11.7                                | 30.15    |
| 08:15 a.m.      | 2            | 10        | 0.37                      | 4.39      | 11.1                                | 26.34    |
| 08:17 a.m.      | 2            | 12        | 0.35                      | 4.74      | 10.5                                | 23.70    |
| 08:19 a.m.      | 2            | 14        | 0.29                      | 5.03      | 8.7                                 | 21.56    |
| 08:21 a.m.      | 2            | 16        | 0.28                      | 5.31      | 8.4                                 | 19.91    |
| 08:24 a.m.      | 3            | 19        | 0.30                      | 5.61      | 6                                   | 17.72    |
| 08:27 a.m.      | 3            | 22        | 0.32                      | 5.93      | 6.4                                 | 16.17    |
| 08:30 a.m.      | 3            | 25        | 0.28                      | 6.21      | 5.6                                 | 14.90    |
| 08:33 a.m.      | 3            | 28        | 0.30                      | 6.51      | 6                                   | 13.95    |
| 08:36 a.m.      | 3            | 31        | 0.29                      | 6.80      | 5.8                                 | 13.16    |
| 08:41 a.m.      | 5            | 36        | 0.54                      | 7.34      | 6.48                                | 12.23    |
| 08:46 a.m.      | 5            | 41        | 0.50                      | 7.84      | 6                                   | 11.47    |
| 08:51 a.m.      | 5            | 46        | 0.47                      | 8.31      | 5.64                                | 10.84    |
| 08:56 a.m.      | 5            | 51        | 0.45                      | 8.76      | 5.4                                 | 10.31    |
| 09:06 a.m.      | 10           | 61        | 0.71                      | 9.47      | 4.26                                | 9.31     |
| 09:16 a.m.      | 10           | 71        | 0.67                      | 10.14     | 4.02                                | 8.57     |
| 09:26 a.m.      | 10           | 81        | 0.64                      | 10.78     | 3.84                                | 7.99     |
| 09:36 a.m.      | 10           | 91        | 0.60                      | 11.38     | 3.6                                 | 7.50     |
| 09:56 a.m.      | 20           | 111       | 0.89                      | 12.27     | 2.67                                | 6.63     |
| 10:16 a.m.      | 20           | 131       | 0.54                      | 12.81     | 1.62                                | 5.87     |
| 10:36 a.m.      | 20           | 151       | 0.38                      | 13.19     | 1.14                                | 5.24     |
| 11:01 a.m.      | 25           | 176       | 0.22                      | 13.41     | 0.528                               | 4.57     |

Fuente: Elaboración propia (2017)

(5) Lámina infiltrada parcial = Lectura inicial – lectura final.

(6) Lámina infiltrada acumulada = lectura inicial + lecturas posteriores.

(7) Veloc. de infiltración instantánea (I):  $I = \text{Lámina parcial} / \text{Tiempo parcial} = (5) / (2) * 60$ .

(8) Veloc. de infiltración promedio (Ip).

$I_p = \text{Lámina acumulada} / \text{Tiempo acumulado} = (6) / (3) * 60$

## b. Cálculo de la función de lámina infiltrada acumulada

Cuadro 8.38 Función de la lámina infiltrada acumulada

| Tiempo acumulado (min) To | Lámina infiltrada acumulada (cm) (Icum) | LogT=X       | Log(Icum)=Y  | X*Y          | X <sup>2</sup> | Y <sup>2</sup> |
|---------------------------|-----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| 1                         | 1.05                                    | ---          | ---          | ---          | ---            | ---            |
| 2                         | 1.92                                    | 0.30         | 0.28         | 0.09         | 0.09           | 0.08           |
| 3                         | 2.49                                    | 0.48         | 0.40         | 0.19         | 0.23           | 0.16           |
| 4                         | 3.03                                    | 0.60         | 0.48         | 0.29         | 0.36           | 0.23           |
| 5                         | 3.38                                    | 0.70         | 0.53         | 0.37         | 0.49           | 0.28           |
| 6                         | 3.63                                    | 0.78         | 0.56         | 0.44         | 0.61           | 0.31           |
| 8                         | 4.02                                    | 0.90         | 0.60         | 0.55         | 0.82           | 0.37           |
| 10                        | 4.39                                    | 1.00         | 0.64         | 0.64         | 1.00           | 0.41           |
| 12                        | 4.74                                    | 1.08         | 0.68         | 0.73         | 1.16           | 0.46           |
| 14                        | 5.03                                    | 1.15         | 0.70         | 0.80         | 1.31           | 0.49           |
| 16                        | 5.31                                    | 1.20         | 0.73         | 0.87         | 1.45           | 0.53           |
| 19                        | 5.61                                    | 1.28         | 0.75         | 0.96         | 1.64           | 0.56           |
| 22                        | 5.93                                    | 1.34         | 0.77         | 1.04         | 1.80           | 0.60           |
| 25                        | 6.21                                    | 1.40         | 0.79         | 1.11         | 1.95           | 0.63           |
| 28                        | 6.51                                    | 1.45         | 0.81         | 1.18         | 2.09           | 0.66           |
| 31                        | 6.80                                    | 1.49         | 0.83         | 1.24         | 2.22           | 0.69           |
| 36                        | 7.34                                    | 1.56         | 0.87         | 1.35         | 2.42           | 0.75           |
| 41                        | 7.84                                    | 1.61         | 0.89         | 1.44         | 2.60           | 0.80           |
| 46                        | 8.31                                    | 1.66         | 0.92         | 1.53         | 2.76           | 0.85           |
| 51                        | 8.76                                    | 1.71         | 0.94         | 1.61         | 2.92           | 0.89           |
| 61                        | 9.47                                    | 1.79         | 0.98         | 1.74         | 3.19           | 0.95           |
| 71                        | 10.14                                   | 1.85         | 1.01         | 1.86         | 3.43           | 1.01           |
| 81                        | 10.78                                   | 1.91         | 1.03         | 1.97         | 3.64           | 1.07           |
| 91                        | 11.38                                   | 1.96         | 1.06         | 2.07         | 3.84           | 1.12           |
| 111                       | 12.27                                   | 2.05         | 1.09         | 2.23         | 4.18           | 1.19           |
| 131                       | 12.81                                   | 2.12         | 1.11         | 2.34         | 4.48           | 1.23           |
| 151                       | 13.19                                   | 2.18         | 1.12         | 2.44         | 4.75           | 1.25           |
| 176                       | 13.41                                   | 2.25         | 1.13         | 2.53         | 5.04           | 1.27           |
| <b>Σ</b>                  |                                         | <b>37.78</b> | <b>21.70</b> | <b>33.61</b> | <b>60.48</b>   | <b>18.83</b>   |

Fuente: Elaboración propia (2017)

### c. Cálculo de la función de la velocidad de infiltración instantánea

Cuadro 8.39 Función de la velocidad de infiltración instantánea

| Tiempo acumulado (min) To | Velocidad de infiltración (cm/hora) | LogT=X       | Log(I)=Y     | X*Y          | X <sup>2</sup> | Y <sup>2</sup> |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| 1                         | 63.00                               | ---          | ---          | ---          | ---            | ---            |
| 2                         | 52.20                               | 0.30         | 1.72         | 0.52         | 0.09           | 2.95           |
| 3                         | 34.20                               | 0.48         | 1.53         | 0.73         | 0.23           | 2.35           |
| 4                         | 32.40                               | 0.60         | 1.51         | 0.91         | 0.36           | 2.28           |
| 5                         | 21.00                               | 0.70         | 1.32         | 0.92         | 0.49           | 1.75           |
| 6                         | 15.00                               | 0.78         | 1.18         | 0.92         | 0.61           | 1.38           |
| 8                         | 11.70                               | 0.90         | 1.07         | 0.96         | 0.82           | 1.14           |
| 10                        | 11.10                               | 1.00         | 1.05         | 1.05         | 1.00           | 1.09           |
| 12                        | 10.50                               | 1.08         | 1.02         | 1.10         | 1.16           | 1.04           |
| 14                        | 8.70                                | 1.15         | 0.94         | 1.08         | 1.31           | 0.88           |
| 16                        | 8.40                                | 1.20         | 0.92         | 1.11         | 1.45           | 0.85           |
| 19                        | 6.00                                | 1.28         | 0.78         | 1.00         | 1.64           | 0.61           |
| 22                        | 6.40                                | 1.34         | 0.81         | 1.08         | 1.80           | 0.65           |
| 25                        | 5.60                                | 1.40         | 0.75         | 1.05         | 1.95           | 0.56           |
| 28                        | 6.00                                | 1.45         | 0.78         | 1.13         | 2.09           | 0.61           |
| 31                        | 5.80                                | 1.49         | 0.76         | 1.14         | 2.22           | 0.58           |
| 36                        | 6.48                                | 1.56         | 0.81         | 1.26         | 2.42           | 0.66           |
| 41                        | 6.00                                | 1.61         | 0.78         | 1.25         | 2.60           | 0.61           |
| 46                        | 5.64                                | 1.66         | 0.75         | 1.25         | 2.76           | 0.56           |
| 51                        | 5.40                                | 1.71         | 0.73         | 1.25         | 2.92           | 0.54           |
| 61                        | 4.26                                | 1.79         | 0.63         | 1.12         | 3.19           | 0.40           |
| 71                        | 4.02                                | 1.85         | 0.60         | 1.12         | 3.43           | 0.37           |
| 81                        | 3.84                                | 1.91         | 0.58         | 1.12         | 3.64           | 0.34           |
| 91                        | 3.60                                | 1.96         | 0.56         | 1.09         | 3.84           | 0.31           |
| 111                       | 2.67                                | 2.05         | 0.43         | 0.87         | 4.18           | 0.18           |
| 131                       | 1.62                                | 2.12         | 0.21         | 0.44         | 4.48           | 0.04           |
| 151                       | 1.14                                | 2.18         | 0.06         | 0.12         | 4.75           | 0.00           |
| 176                       | 0.53                                | 2.25         | -0.28        | -0.62        | 5.04           | 0.08           |
| <b>Σ</b>                  |                                     | <b>37.78</b> | <b>22.00</b> | <b>24.97</b> | <b>60.48</b>   | <b>22.82</b>   |

Fuente: Elaboración propia (2011)

### d. Cálculo de los Parámetros de la Función de Lámina Acumulada (Iac)

Se tiene el modelo:  $I_{ac} = A * T_o^B$

Cálculo de B:

$$B = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad \text{Dónde: } n = \text{número de datos procesados (n=28)}$$

$$B = 0.4258$$

Cálculo de A:

$$A = \text{antilog}(A_o)$$

$$A_o = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{B * \sum X_i}{n} \Rightarrow A_o = 0.2078$$

$$A = \text{antiLog}(0.2078)$$

$$A = 1.6137$$

$$I_{CUM} = 1.6137 * T_o^{0.4278} \text{ (cm)} \quad ; \quad T_o \text{ (min)}$$

Cálculo del Coeficiente de Determinación:

$$r^2 = \frac{\left[ \sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} \right]^2}{\left[ \sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right] \left[ \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right]}$$

$$r^2 = 0.9753$$

Lo que quiere decir que el 97.53 % de la variación de lámina infiltrada acumulada es explicado por el tiempo transcurrido y el modelo es altamente confiable.

#### **e. Cálculo de parámetros de la función de la velocidad de infiltración instantánea**

**(I)**

Se tiene el modelo:  $I = a * T_o^b$

Cálculo de b:

$$b = \frac{n * (\sum X_i * Y_i) - \sum X_i * \sum Y_i}{n * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \Rightarrow b = -0.7617$$

Cálculo de a:

$$a = \text{antilog}(a_o)$$

$$a_o = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{b * \sum X_i}{n} \Rightarrow a_o = 1.8804$$

$$a = \text{antilog}(1.8804)$$

$$a = 75.92$$

Por lo tanto la función de la velocidad de infiltración instantánea, I:

$$I = 75.92 \cdot T_o^{-0.7617} \quad (\text{cm/hora}) \quad ; \quad T_o \text{ (min)}$$

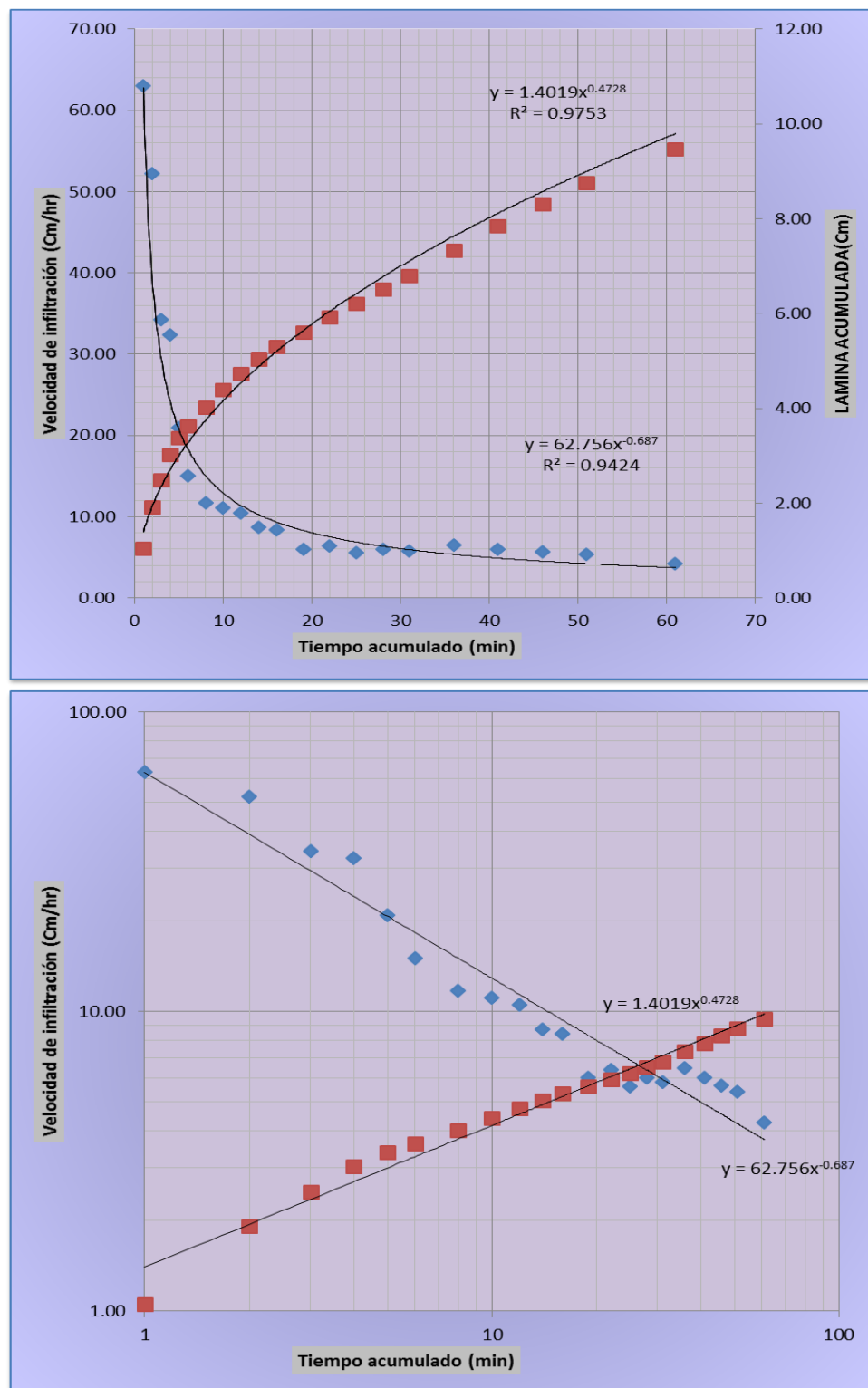


Gráfico 8.9 Curva de la función de lámina acumulada (Iac) y la velocidad de infiltración instantánea (I)

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del Coeficiente de Determinación:

$$r^2 = \frac{\left[ \sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} \right]^2}{\left[ \sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right] \left[ \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right]}$$

$$r^2 = 0.9424$$

Lo que quiere decir que el 94.24 % de la variación de la velocidad de infiltración instantánea es explicado por el tiempo transcurrido y el modelo es altamente confiable.

#### f. Cálculo de la infiltración básica y el tiempo en que ocurre

El tiempo en que ocurre la infiltración básica ( $T_b$ ) es:

$$T_b = -600 \text{ b}$$

$$T_b = -600 * (-0.7617) = 457 \text{ min.}$$

$$T_b = 7.617 \text{ horas}$$

$$T_b = 457 \text{ min.}$$

La infiltración básica ( $I_b$ ) es:

$$I_b = a (T_b)^b$$

$$I_b = 75.92 * (457)^{-0.7617}$$

$$I_b = 0.0119 \text{ cm /min} = 0.72 \text{ cm/h} = 7.2 \text{ mm/h}$$

Del cuadro 8.35 y 8.36, se determina que el tipo de suelo es Franco Arcilloso.

#### g. Modelos matemáticos obtenidos

- De la Lamina Infiltrada Acumulada ( $I_{ac}$ )

$$I_{acum} = 1.6137 * T_o^{0.4278} (\text{cm}); T_o (\text{min})$$

Dónde:

$$I_{cum.} = \text{cm.}$$

$$T_o = \text{min.}$$

- De la Velocidad de Infiltración Instantánea (I)

$$I = 75.92 * T_o^{-0.7617} \quad (cm/hora) \quad ; \quad T_o \text{ (min)}$$

Donde:

I = cm/h

T<sub>o</sub> = min.

- De la Velocidad de Infiltración Básica (I<sub>b</sub>)

$$I_b = 75.92 * T_b^{-0.7617}$$

Dónde:

I<sub>b</sub> = cm/h

T<sub>b</sub> = min.

## **8.8 Panel fotográfico**

### 8.8.1 Vistas generales

Foto 1. Entrada a Niño Yucaes



Foto 2. Pendiente y erosión en laderas

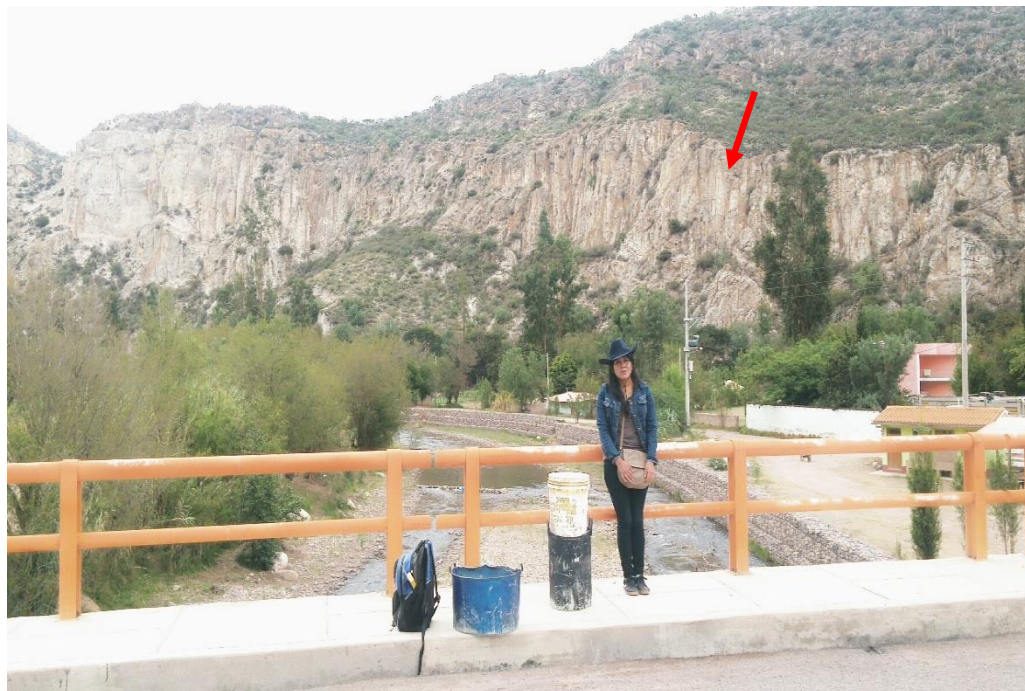


Foto 3. Erosión por cárcavas o zanjas en las laderas



Foto 4. Siembra en terrenos planos al margen del río



Foto 5. Poca vegetación riparia en las márgenes del río



Foto 6. Erosión de las riberas de los ríos. Poca vegetación riparia



Foto 7. Entrevista a lugareños de la zona de Yucaes



### 8.8.2 Panel de prácticas de conservación del suelo y del agua

Foto 8. Recuperación de riberas de ríos - vegetación riparia



Foto 9. Prácticas de conservación en las márgenes del río (gaviones)



Foto 10. Defensa de márgenes del río - gaviones



Foto 11. Defensa de márgenes del río - caballetes



Foto 12. Cárcavas en la ladera de Cachipaccha - Yucaes

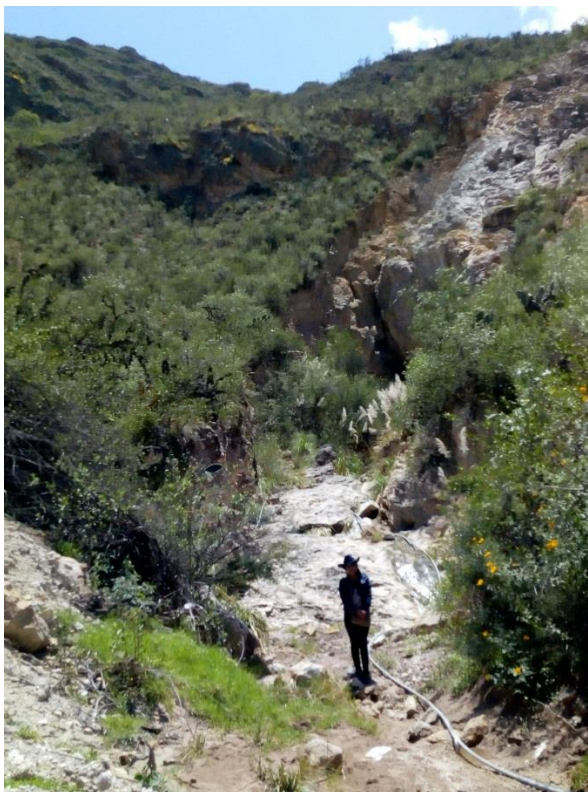


Foto 13. Dimensiones de la sección transversal de la cárcava (ancho superior)



Foto 14. Dimensiones de la sección transversal de la cárcava (ancho inferior)



Foto 15. Dimensiones de la sección transversal de la cárcava (altura)

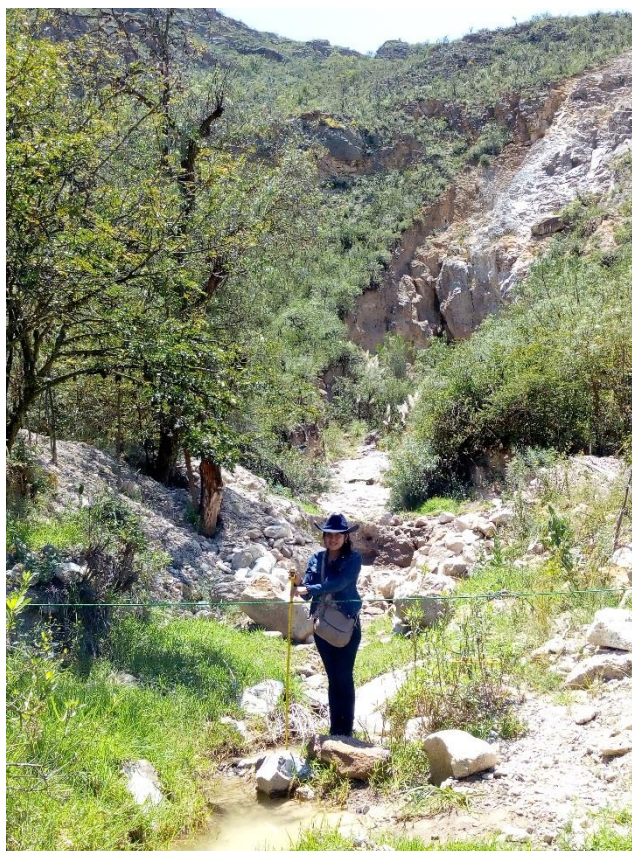


Foto 16. Pendiente de la cárcava



### 8.8.3 Panel de prueba de infiltración

Foto 17. Instalación de los Anillos concéntricos



Foto 18. Recojo del agua para realizar la prueba de infiltración



Foto 19. Cubriendo con plástico antes del llenado de agua para evitar la errores en los cálculos de la prueba de infiltración y ubicada la regla graduada



Foto 20. Vertido del agua, se procede a quitar el plástico y alistado del cronómetro



Foto 21. Medición de la filtración del agua con el cronómetros



Foto 22. Anotaciones de las lecturas



## 8.9 Planos