



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA – ARGENTINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**



**MAGISTER EN MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS**

**HIDROGRÁFICAS**

**Tesis**

**Evaluación y Categorización de la Degradación de Suelos por Intervención Antrópica en  
la Cuenca del Arroyo Santa María, Provincia de Corrientes.**

Evaluation and Categorization of Soil Degradation by Anthropic Intervention in the Arroyo Santa  
María Basin, Province of Corrientes.

Alumno: Ing. Agr. Diego Ybarra

[ybarra.diego@inta.gob.ar](mailto:ybarra.diego@inta.gob.ar)

Director: Dra. Fernanda J. Gaspari

Co Director: Ing. Agr. Daniel Ligier

Corrientes, Mayo 2019

## **Resumen**

Se analiza la cuenca de llanura del arroyo Santa María (centro-norte de la provincia de Corrientes, Argentina). El objetivo fue evaluar y categorizar la degradación de suelos mediante la estimación cuantitativa de erosión hídrica superficial; la estabilidad estructural y el índice de fertilidad global, utilizando un entorno SIG. Se seleccionaron sitios mediante tipos, usos y manejos de suelos, identificados con imágenes satelitales y cartografía de suelos creada para la cuenca. En total se analizaron nueve tipos de suelos y seis manejos diferentes. Los resultados permitieron generar una base de datos inédita georreferenciada de degradación de suelos. Considerando también que la información generada es imprescindible y será de mucha utilidad, contribuyendo a la generación de políticas favorables a un desarrollo equilibrado y sostenible de la cuenca e inclusive la futura creación de un comité de cuenca.

Palabras clave: Cuenca; EUPS; erodabilidad; SIG, estabilidad estructural, fertilidad global.

## **Abstract**

In the thesis, the Santa María watershed was deeply analyzed and characterized. The Santa María watershed is located in northern-central part of the province of Corrientes, Argentina. The objectives of this work aimed to the evaluation and categorization of topsoil degradation processes influencing soil erosion. Hence, water erosion, soil stability and fertility were modeled based on field data to predict the soil erosion risk. This study was performed for nine different lands uses and six different soil types. The results were modeled and mapped using remote sensing and GIS tools. The results presented in this thesis include not only novel georeferenced databases, but also precise maps of topsoil degradation. Considering too that the information generated is essential and will be very useful, contributing to the generation of favorable policies for a balanced and sustainable development of the basin and even the future creation of a basin committee.

Keywords: Basin; USLE; erodability; GIS, structural stability, global fertility.

## INDICE GENERAL:

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Degradación de suelos. Evaluación y cuantificación.....	4
1.1.1	Erosión hídrica.....	4
1.1.2	Estabilidad estructural: .....	4
1.1.3	Índice de fertilidad global .....	5
1.1.4	Ordenamiento territorial .....	5
1.2	Antecedentes.....	6
2	OBJETIVOS.....	7
2.1	General.....	7
2.2	Específicos .....	7
2.3	Área de estudio .....	8
3	HIPOTESIS DE TRABAJO.....	9
4	MATERIALES Y METODOS .....	9
4.1	Delimitación de la cuenca .....	9
4.2	Caracterización general de la cuenca.....	11
4.2.1	Clima .....	12
4.2.2	Precipitación .....	13
4.2.3	Temperatura .....	14
4.2.4	Red hidrográfica .....	14
4.2.5	Red vial .....	14
4.2.6	Morfometría .....	14
4.2.7	Sociocultural .....	23
4.2.8	Económica - Productiva.....	23
4.3	Suelos .....	24
4.4	Uso del suelo de la Cuenca del Arroyo Santa María.....	25
4.5	Erosión Hídrica Potencial.....	28
4.6	Pérdida de suelo potencial por erosión hídrica superficial en la Cuenca del Arroyo Santa María	29
4.6.1	Factor R (erosividad de la lluvia).....	30
4.6.2	Factor K (erodabilidad de los suelos).....	31
4.6.3	Factor topográfico: L (longitud de pendiente) y S (gradiente de pendiente). .....	36

4.7	Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica (EUPS) Actual en la Cuenca del Arroyo Santa María	38
4.7.1	Factor C (cultivos y manejo del suelo)	39
4.7.2	Factor P (prácticas de conservación de suelos)	39
4.8	Determinación de la estabilidad estructural de los suelos	40
4.9	Determinación del índice de fertilidad global	44
4.10	Pautas de Manejo Integrado de los recursos en la Cuenca del Arroyo Santa María	46
4.11	Sistema Información Geográfica para la Cuenca del Arroyo Santa María	46
5	RESULTADOS:	47
5.1	Límite de cuenca o divisoria de aguas:	47
5.2	Caracterización general de la Cuenca del Arroyo Santa María	48
5.2.1	Clima	48
5.2.2	Precipitación:	49
5.2.3	Temperatura:	49
5.2.4	Red hidrográfica:	50
5.2.5	Red vial:	56
5.2.6	Morfometría:	58
5.2.7	Sociocultural	66
5.3	Suelos	70
5.4	Uso del suelo de la cuenca del arroyo santa maría	73
5.5	Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)	77
5.5.1	Factor (R) erosividad de las lluvias	77
5.5.2	Factor (K) erodabilidad del suelo	79
5.6	Factor Topográfico: L (longitud de pendiente) y S (gradiente de pendiente)	98
5.7	Factor C de la ecuación universal de pérdidas de suelos (EUPS)	100
5.8	Perdida de suelo potencial en la Cuenca del Arroyo Santa María	101
5.8.1	Erosión Hídrica Actual	108
5.9	Estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais	111
5.10	Índice de Fertilidad Global	115
5.11	Pautas de Manejo de la cuenca hidrográfica	121
6	CONCLUSIONES	122
7	AGRADECIMIENTOS	124
8	BIBLIOGRAFÍA	125
9	Anexos	131
9.1	Anexo I: Materia Orgánica	131

9.2	Anexo II: Textura de suelos .....	132
9.3	Anexo III: Infiltración .....	142
9.3.1	Medición de la infiltración en algunos de los sitios evaluados.....	144
9.4	Anexo IV: Estructura de suelos.....	152
9.5	Anexo V: Erosión Hídrica.....	154
9.6	Anexo VI: Estabilidad de Agregados.....	155
9.6.1	Humectación rápida, inmersión en agua o efecto estallido (DMPe). .....	155
9.6.2	Disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd) .....	156
9.6.3	Humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc) .....	157
9.6.4	Medición de la distribución del tamaño de las partículas resultantes: .....	158
9.6.5	RELACION DEL DIAMETRO MEDIO PONDERADO (DMP) Y EL CONTENIDO DE ARCILLA, LIMO, ARENA MUY FINA Y MATERIA ORGANICA .....	161
9.7	Anexo VII: Índice de Fertilidad Global.....	164

#### INDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Área de Estudio, Municipio Caa Catí- Departamento de Gral. Paz y Municipio Berón de Astrada- Departamento de Berón de Astrada, Provincia de Corrientes. Elaboración propia en base al mapa de Municipios provisto por Grupo de Recursos Naturales, EEA, INTA, Corrientes. ....	8
Figura 2: Imágenes del satélite SPOT 5, necesarias para el abarcamiento del área de estudio, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí. ....	10
Figura 3: Mosaico del Modelo de Elevación Digital Shuttle Radar Topography Mission (STRM) de la Provincia de Corrientes, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí. ....	11
Figura 4: Regiones climáticas de Corrientes (Castro et. al. 1991). ....	13
Figura 5: Mapas de suelos base de la digitalización del mapa de suelos de la cuenca del arroyo Santa María, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí. ....	25
Figura 6: Mosaico de imágenes satelitales SPOT 5, noviembre del 2013, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí. ....	26
Figura 7: Esquema metodológico para la definición de paisajes erosivos. Fuente: (ICONA, 1982) .....	28
Figura 8: Agregados preparados para humectación rápida, por inmersión en agua o efecto estallido (DMPe). ....	41
Figura 9: Disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd). ....	42
Figura 10: Agregados preparados para humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc). ....	42
Figura 11: Tamizador FEODOROFF, columna de tamices para clasificación de agregados en seco >2.000 µm, 2.000-1.000 µm, 1.000-500 µm, 500-200 µm, 200-100 µm y 100-50 µm.....	43

Figura 12: Limite de cuenca o divisoria de aguas de la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 13: Ubicación de la Cuenca del Arroyo Santa María en la zona climática (B1 B'4 r a') y (B2 B'4 r a') según KÖPPEN. Fuente elaboración propia.....	48
Figura 14: Distribución media mensual de la precipitación departamento de Gral. Paz-Corrientes. Fuente: elaboración propia. ....	49
Figura 15: Temperaturas Medias Mensuales, periodo 1960-1995 del departamento Gral. Paz-Corrientes. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 16: Red Hidrográfica de la cuenca del arroyo Santa María año 2013. Imagen Satélite SPOT 5. Fecha de imagen septiembre 2013. Fuente: elaboración propia.....	52
Figura 17: Dirección de Flujo indefinido en la cuenca de arroyo Santa María. La georreferenciación S 27°30'88''; W 57°46'84'' indica el sitio donde ocurre el flujo indefinido. Fuente: elaboración propia. ....	54
Figura 18: Dirección de Flujo Laminar y Flujo concentrado del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.....	55
Figura 19: Red Vial de la cuenca, Rutas Nacionales, Rutas Provinciales y caminos vecinales. En azul se identifican situaciones de represamiento de cuerpos de aguas causados por los caminos. Fuente: elaboración propia. ....	57
Figura 20: Modelo de Elevación Digital SRTM 2013, de la Cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 21: Intervalos de altura de la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	61
Figura 22: Curva Hipsométrica. Fuente: elaboración propia. ....	63
Figura 23: Histograma de Frecuencias Altimétricas. Fuente: elaboración propia. ....	63
Figura 24: Cauce principal del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	65
Figura 25: Estructura poblacional quinquenal del Municipio Berón de Astrada. Fuente: DEyC de Corrientes 2010.....	66
Figura 26: Estructura poblacional quinquenal del municipio de Caá Catí. Fuente: DEyC de Corrientes 2010. ....	67
Figura 27: Ubicación de Escuelas Primarias y Secundarias en la cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	68
Figura 28: Ubicación de Hospitales y Centros de Salud en la cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.....	69
Figura 29: Suelos de la cuenca del arroyo Santa María, escala 1:50000. Fuente: elaboración propia. ....	72
Figura 30: Uso del Suelo en la Cuenca del Arroyo Santa María, año 2013. Fuente: elaboración propia. ...	76
Figura 31: Erosividad media anual de la lluvia en la cuenca del arroyo Santa María en los años 1960-1995. Fuente: elaboración propia.....	77
Figura 32: Contenido de Materia Orgánica en sitios evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (Eucaliptus grandis); Pastura: Pastura (Brachiaria brizantha).....	81
Figura 33: Determinación de la infiltración (mm.h <sup>-1</sup> ) en sitios evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie	

Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> ); Pastura: Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> ). .....	86
Figura 34: Coeficiente de Análisis de regresión entre variables evaluadas y el Factor K en sitios con textura Arenosa franca. Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. a) Asociación $R^2$ entre Limo y Factor K. b) Asociación $R^2$ entre Arena Muy Fina y Factor K. c) Asociación $R^2$ entre Arcilla y Factor K. d) Asociación $R^2$ entre Materia Orgánica y Factor K. e) Asociación $R^2$ entre Infiltración y Factor K. MO: Materia Orgánica. ....	90
Figura 35: Coeficiente de análisis de regresión $R^2$ entre variables evaluadas y el Factor K en sitios con textura franco arenosa. Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. a) Asociación $R^2$ entre Limo y Factor K. b) Asociación $R^2$ entre Arena Muy Fina y Factor K. c) Asociación $R^2$ entre Arcilla y Factor K. d) Asociación $R^2$ entre Materia Orgánica y Factor K. e) Asociación $R^2$ entre Infiltración y Factor K. MO: Materia Orgánica. ....	92
Figura 36: Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Erodabilidad de suelos para los usos y series evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> ); Pastura: Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> ). ....	95
Figura 37: Erodabilidad de suelos ( $Mg.ha.h.MJ^{-1}.mm^{-1}.ha^{-1}$ ) de la Cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	97
Figura 38: Factor LS de la Ecuación Universal de Perdidas de Suelos (EUPS). Fuente: elaboración propia. ....	99
Figura 39: Coeficiente de análisis de regresión entre valores del Factor K y la Erosión Hídrica Superficial ( $Mg\ ha^{-1}\ Año^{-1}$ ).Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. ....	102
Figura 40: Coeficiente de análisis de regresión entre valores del Factor LS y la Erosión Hídrica Superficial ( $Mg.ha^{-1}.Año^{-1}$ ).Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. ....	102
Figura 41: Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Erosión Hídrica Potencial calculada por la EUPS, para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> ); Pastura: Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> ). ....	105
Figura 42: Erosión Hídrica Potencial ( $Mg. ha^{-1}.Año^{-1}$ ) en la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	107
Figura 43: Erosión Hídrica Actual en ( $Mg.ha^{-1}.Año^{-1}$ ) en la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia. ....	109
Figura 44: Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Estabilidad de Agregados (Le Bissonnais), para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> ); Pastura: Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> ). ....	114
Figura 45: Coeficiente de análisis de regresión $R^2$ entre variables evaluadas e Índice de Fertilidad Global. a) Asociación $R^2$ entre Materia Orgánica e IFG. b) Asociación $R^2$ entre pH e IFG. c) Asociación $R^2$ entre Saturación de Bases e IFG. d) Asociación $R^2$ entre Capacidad de Intercambio Catiónico e IFG. IFG: Índice	

de Fertilidad Global. MO: Materia Orgánica. SAT: Saturación de Bases de Intercambio. CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva .....	116
Figura 46: Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Índice de Fertilidad Global, para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (Eucaliptus grandis); Pastura: Pastura (Brachiaria brizantha) .....	119
Figura 47: Destrucción de la materia orgánica mediante la digestión con agua oxigenada (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) y calor constante .....	139
Figura 48: Muestras de suelo listas para trasvase a probetas de vidrio .....	139
Figura 49: Dispersión de las muestras mediante un dispersor eléctrico .....	140
Figura 50: Determinación de la densidad mediante densímetro, colocado dentro de probetas de vidrio .....	141
Figura 51: Determinación de la Infiltración con infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Pasturas de 1 año de implantación sobre la serie de suelos Chavarría. ....	144
Figura 52: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Eucaliptus grandis de 5 años de implantación sobre la serie de suelos Loreto. ....	145
Figura 53: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Eucaliptus grandis de 3 años de implantación sobre la serie de suelos Berón de Astrada. ....	146
Figura 54: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en Bosque Nativo sobre la serie de suelos Berón de Astrada. ....	147
Figura 55: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Torres. ....	148
Figura 56: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Ganadería Extensiva sobre la serie de suelos Torres .....	148
Figura 57: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Chequin. ....	149
Figura 58: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Timbó Paso. ....	150
Figura 59: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en Bosques Nativos sobre la serie de suelos Timbó Paso. ....	150
Figura 60: Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Pasturas de 5 año de implantación sobre la serie de suelos Loreto. ....	151
Figura 61: Muestra de 10 g de agregados de suelo tamizada en de tamiz de 5 mm .....	155
Figura 62: Muestra de 10 g de agregados de suelo previa humectación rápida con agua destilada y etanol .....	155
Figura 63: Disgregación mecánica de agregados mediante el tamizador FEODOROFF. ....	156
Figura 64: Muestras de 10 g de agregados en bandeja de humectación lenta con agua por capilaridad. ....	157
Figura 65: Tamización y clasificación de muestras secas luego de la dispersión, con tamices de >2.000 µm, 2.000-1.000 µm, 1.000-500 µm, 500-200 µm, 200-100 µm y 100-50 µm .....	160
Figura 66: Coeficiente de Correlación R <sup>2</sup> entre el DPM y el contenido de limo .....	161

Figura 67: Coeficiente de Correlación $R^2$ entre el DPM y el contenido de Arena Muy Fina.....	161
Figura 68: Coeficiente de Correlación $R^2$ entre el DPM y la infiltración (cm/h) .....	162
Figura 69: Coeficiente de Correlación $R^2$ entre el DPM y el contenido de .....	162
Figura 70: Coeficiente de Correlación $R^2$ entre el DPM y el contenido de Materia Orgánica .....	163

## INDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Diferencias entre paisajes ondulados y paisajes llanos* .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2: Diferencias entre cuencas de Montañas y cuencas de Llanuras* .....	2
Tabla 3: Sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.....	27
Tabla 4: Rangos y tipos de pendientes, según (López Cadenas de Llano, 1998). <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 5: Clasificación de la erodabilidad de suelos según (USDA, 1962), citado en (Amezquita, 1990). ..	32
Tabla 6: Fracción y diámetro granulométrico de partículas de suelos según USDA.....	33
Tabla 7: Identificación de tipo y clase de Estructura. Tomado de (Schoeneberger, 2012). .....	34
Tabla 8: Valor c (permeabilidad) de la ecuación del Factor K de la EUPS (erodabilidad), tomado de Iurtia <i>et al</i> (2007). .....	35
Tabla 9: Clases de Erosión hídrica para la Provincia de Corrientes, tomado de Ligier et al. (1998). .....	39
Tabla 10: Valores de clasificación de Estabilidad de Agregados .....	44
Tabla 11: Propiedades edáficas y rangos asignados para el cálculo del IFG (Ligier et. al.1999). .....	45
Tabla 12 Niveles de Fertilidad Global según Ligier et. al. (2014). .....	45
Tabla 13: Series de suelos de la cuenca del arroyo Santa María .....	71
Tabla 14: Usos de suelos identificados en la Cuenca del Arroyo Santa María .....	75
Tabla 15: Principales tributarios del arroyo Santa María .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 16: Parámetros de Formas de la cuenca del arroyo Santa María .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 17: Valores altitudinales necesarios para la construcción de la Curva Hipsométrica.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 18: Parámetros de relieve de la cuenca del arroyo Santa María.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 19: Parámetros de la red Hidrográfica de la cuenca del arroyo Santa María <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 20: Analfabetismo del Municipio Berón de Astrada .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 21: Analfabetismo del Municipio Caá Catí .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 22: Condición de ocupación en el Municipio Berón de Astrada.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 23: Condición de ocupación en el Municipio Caá Catí .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 24: Población con Necesidades Básicas Insatisfechas en el Municipio Berón de Astrada en el ámbito rural. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Tabla 25: Población con Necesidades Básicas Insatisfechas en el Municipio de Caá Catí en el ámbito rural. .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 26: Tipos de texturas clasificados para series y usos de suelos evaluados en la cuenca. ....	83
Tabla 27: Coeficiente de correlación entre el factor K y distintas variables de suelos con textura Arenosa franca obtenidas para los diferentes sitios evaluados. ....	88
Tabla 28: Coeficiente de correlación entre el factor K y distintas variables de suelos con textura Franco Arenosa obtenidas para los diferentes sitios evaluados. ....	91
Tabla 29: Valores del factor C de la USLE tomados de Marelli, 2012 e Irurtia, 2007 para los usos de suelos evaluados en la cuenca del arroyo Santa María. ....	100
Tabla 30: Matriz de correlación (Pearson). Error 0,05%. ....	101
Tabla 31: Clasificación de la Erosión Hídrica Potencial en la cuenca. ....	106
Tabla 32: Clasificación de la Erosión Hídrica Actual en la cuenca. ....	108
Tabla 33: Clasificación Erosión hídrica Potencial y Actual en la cuenca del arroyo Santa María .....	110
Tabla 34: Clasificación de Estabilidad de Agregados frente a la erosión hídrica. ....	111
Tabla 35: Matriz de correlación de Pearson entre variables calculadas para determinar el IFG y el IFG. ....	117
Tabla 36: Clasificación de valores de Índice de Fertilidad Global para los sitios evaluados según Ligier et. al. (2014) .....	120

# **Evaluación y Categorización de la Degradación de Suelos por Intervención Antrópica en la Cuenca del Arroyo Santa María, Provincia de Corrientes.**

## **1 INTRODUCCIÓN**

El deterioro de los suelos, ocasionado por procesos erosivos, es uno de los más conocidos tanto en las regiones húmedas como semiáridas del país (Ligier et. al., 1998; Casas et. al., 2015). Los problemas que se originan en el manejo inadecuado de los recursos naturales afectan seriamente la capacidad productiva de los sistemas agrícolas y finalmente repercuten a mediano y largo plazo en la calidad de vida de los habitantes (Gaspari et. al., 2009).

Uno de los aspectos más importantes de la sustentabilidad lo constituye la conservación de suelos, siendo la erosión hídrica un proceso de degradación del suelo debido a causas antrópicas. De esta manera, si se conoce la tasa de pérdida de suelos aceptable o tolerable, se puede comparar con las tasas de pérdida para distintos manejos. Si la tasa de pérdida de un manejo dado supera la tolerable, se debe corregir el manejo (Irurtia et. al., 2007).

Los estudios de la dinámica de cambios de la cobertura de suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden y Oldeman, 1997). Los cambios de cobertura y uso del suelo, sin criterios de manejo racional, pueden causar deterioro ambiental, ocasionando cambios más o menos relevantes en la dinámica hídrica.

En la Provincia de Corrientes, Argentina, se detectaron daños provocados por erosión hídrica, tanto en tierras dedicadas a la agricultura de secano y riego, como en áreas bajas afectadas por procesos hidromórficos, utilizados con ganadería extensiva, conformando 2.260.000 hectáreas. (Ligier et. al., 1997; Escobar et. al., 1994; Casas et. al., 2015). Los signos de erosión se presentan, tanto en tierras altas (lomeríos con erosión laminar y/o surcos), como en tierras bajas (zonas localmente llamadas malezales, con erosión reticular).

Desde un punto de vista hidrográfico, la cuenca del arroyo Santa María, se encuentra ubicada en el norte de la provincia de Corrientes. Abarcando los departamentos de Berón de Astrada y General Paz.

La cuenca hidrográfica es la unidad natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico, económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión (Gaspari et. al. 2009). Por ello el

enfoque adecuado para comprender y resolver procesos de degradación ambiental y productiva que impactan negativamente sobre la sustentabilidad es tomando como unidad de gestión el “sistema cuenca” (García Nájera, 1962; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Por lo general, para caracterizar cuencas se utilizan parámetros claros de tipo geomorfológicos, topográficos y morfométricos. Su estudio comienza por considerar esos aspectos básicos; existiendo así cuencas que no poseen superficie tributaria definida, y tampoco cuentan con componentes lineales organizados y jerarquizados, conformando su estructura de disipación (escurrimientos areales, mantiformes, etc.). En algunos casos, quizás en la mayoría, se cuenta con una anarquía muy acentuada entre los diferentes niveles de disipación. Estos casos se encuentran muy a menudo en el norte de la Argentina, sistemas de este tipo, conforman gran parte de las provincias de Santa Fe, Chaco, Corrientes y Formosa (Mejía et al, 1983).

La región se caracteriza por presentar un relieve plano con bajos rangos de pendiente, que genera condiciones puntuales sobre la dinámica hidrológica de la cuenca del arroyo Santa María. Los procesos que involucran a estos tipos de cuencas son considerados en los estudios geomorfológicos como fenómenos no típicamente hidrológicos o Sistemas Hidrológicos No Típicos (Mejía et. al. 1983). Esto define un cierto riesgo respecto a la transferencia de conceptos, es decir, se trata de introducir elementos y criterios aplicables a Sistemas Hidrológicos Típicos (S.H.T.) en los Sistemas Hidrológicos No Típicos (S.H.N.T.), transformando al medio, para así poder adaptarlo a situaciones conocidas (Mejía 1983; Damiano, 2017).

Los S.H.T. y los S.H.N.T. generalmente y en sus rasgos generales poseen las características de las cuencas de montaña y de llanura (Mejía et. al. 1983). En la Tabla 1, se pueden visualizar las diferencias que existen entre las cuencas de montañas y cuencas de llanura, evidenciando las diferencias morfológicas, la dinámica hídrica, la topografía y la distribución demográfica que existe en cada uno de estos sistemas.

**Tabla 1:** Diferencias morfológicas entre cuencas de Montañas y cuencas de Llanuras\*.

FACTORES o CONDICIONES	CUENCAS	
	LLANURA	MONTAÑA
Delimitación	Divisorias de aguas de difícil definición	Divisorias de aguas visibles
Pendientes	Muy bajas a bajas	Altas
Áreas definidas	Regiones Homogéneas	Cuencas Hidrográficas

Procesos Predominantes	Movimientos verticales (Infiltración-Percolación-Almacenamientos)	Movimientos Horizontales (escurrimientos)
Estabilidad Hidrológica	Mayor	Menor
Parámetros	Humedad en el suelo, Infiltración, Variación de Almacenamientos	Escurrimiento, Caudal de avenida
Métodos-Pronósticos	Sensores remotos, superficies freáticas, curvas alturas-caudal-gradiente, aguas superficiales-subterráneas-paleomorfología, Modelos	Relación altura-caudal, Modelos hidrológicos
Actividad Socioeconómica	Mayor	Menor

\*Extraída de Gaspari et. al. (2013).

En estas áreas, las cuencas y subcuencas son difíciles de determinar a partir de relevamiento topográfico y más cuando sus límites son poco marcados. En épocas de inundaciones, especialmente cuando llegan a acumularse grandes volúmenes de agua en ciertas zonas, la misma puede desbordar por sobre las divisorias de aguas poco definidas, produciéndose efectivamente un trasvase entre subcuencas próximas. Dado que existen pocos cauces definidos y muchas depresiones sin drenaje, la mayor parte de los excedentes fluye primero hacia la depresión más cercana, y solo se produce escurrimiento superficial cuenca abajo cuando los bajos comienzan a colmarse de agua (Badano, 2010). Uno de los principales problemas a los cuales se enfrentan científicos y tomadores de decisión es a la ausencia de correctas delimitaciones de cuencas (Barrow, 1998; Verdin, 1999; Donnell y Woods, 2004; NRCS, 2004). La delimitación de cuencas hidrográficas constituye un insumo esencial para llevar a cabo la planificación y la gestión de los recursos naturales bajo el enfoque de cuencas (Gaspari et. al., 2010).

Debido a la falta de información existente en la cuenca del Arroyo Santa Maria se pretende evaluar y categorizar la degradación de los suelos, tomando como variables a la erosión hídrica, a la estabilidad de los agregados y al índice de Fertilidad Global. Evaluando la mayoría de los usos existentes en la cuenca, realizados sobre los diferentes suelos presentes. Dejando en

evidencia si la planificación y el ordenamiento de la cuenca están realizándose de manera correcta, de manera sostenible.

## 1.1 Degradación de suelos. Evaluación y cuantificación

### 1.1.1 Erosión hídrica

En términos conceptuales, la erosión se define como un proceso de desgaste del terreno que ocurre naturalmente (erosión geológica). No obstante, es casi siempre magnificado por la acción del hombre (erosión antrópica o acelerada) y sobre este efecto es que se pone el énfasis al definir programas de desarrollos agropecuarios sustentables (Ligier et. al., 1998). Siendo la erosión hídrica posiblemente el tipo de erosión más importante, debido a que es irreversible y de magnitud significativa. Se calcula que para tener un centímetro de suelo mineral en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, razón por lo que se considera como un recurso natural no renovable dentro de la escala de tiempo humana. (Montes et. al. 2011; SEMARNAT, 2013).

Para la planificación del uso del suelo y desarrollo de estrategias de conservación, es necesario estimar las tasas de erosión e identificar las áreas vulnerables.

Siendo el mapeo regional de riesgos de erosión una herramienta esencial para la planificación del territorio y un adecuado uso del suelo. Además, los suelos con mayor riesgo a la degradación física, que limitan el desarrollo agrícola sostenido, corresponden a los de mayor inestabilidad estructural. Un bajo contenido de materia orgánica, pobre cobertura del suelo y labranzas inadecuadas, sin fertilización orgánica aumentan el riesgo de degradación (Fernandez de Andrade, 2014).

### 1.1.2 Estabilidad estructural:

La Estabilidad Estructural juega un rol importante en la sustentabilidad del sistema, siendo esta una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Doran & Parkin, 1994). La estabilidad de los agregados influye en diversos aspectos del comportamiento físico de un suelo, particularmente en la infiltración del agua y la erosión del suelo (De Ploey y Poesen, 1985). Los suelos agregados son más resistentes que los débilmente agregados. Los factores que afectan a la agregación del suelo son el contenido de agua, la textura, el tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica y el tamaño de los agregados (Hartge y Horn, 1984; Horn y Dexter, 1989; Horn et. al., 1995); citado por (Lal, 2004). La estabilidad de la estructura, es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas

originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). El conocimiento de la magnitud, y distribución de la resistencia del agregado es la clave para entender la respuesta del suelo a la labranza o el tráfico de maquinaria (Lal, 2004).

Debido a que la ruptura de los agregados en el suelo se puede dar por compresión del aire ocluido originando un efecto del estallido del agregado. También se puede dar una ruptura mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia creando microfisuras del agregado, las rupturas también pueden darse por agrandamiento diferencial de los agregados debido a la absorción de agua capilar (Amézquita, 1999). En general, la medición de la estabilidad estructural en laboratorio intenta reproducir alguno de estos mecanismos (Le Bissonnais, 1996).

### 1.1.3 Índice de fertilidad global

Conociendo que un suelo fértil es aquel que tiene la capacidad de suministrar los nutrientes suficientes al cultivo, asegurando su crecimiento y su desarrollo (Brady, 1990; Havlin et. al. 1999), y para lo cual se propone estudiar al Índice de Fertilidad Global-IFG, como indicador de sustentabilidad del recurso (Ligier et. al., 2014). Entonces evaluando la oferta de nutrientes de los suelos en condiciones naturales, básicamente los valores de acidez, expresados como pH y/o saturación de aluminio, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, calcio, potasio; y como elemento de arranque del cultivo, el fósforo asimilable, además de los niveles de materia orgánica, como variable relacionada a la actividad biológica (Ligier et. al. 2001).

### 1.1.4 Ordenamiento territorial

Los problemas ambientales que sufre nuestro país en su espacio rural, son ocasionados por la deficiente o falta total de planificación de uso del territorio, muchas veces gestionando el uso en base a parámetros de mercado y olvidándose de parámetros ambientales como parte de esa planificación (Perucca et. al., 2009). Los gobiernos provinciales, los productores agrícolas-ganaderos y o forestales intervinientes en la cuenca del arroyo Santa Maria no cuentan con la información necesaria y suficiente para afrontar el ordenamiento de la cuenca.

La necesidad de equilibrar el aumento de la presión ejercida sobre los recursos naturales, los límites de la capacidad de producción de estos y mejorar la calidad de vida en el medio rural, lleva a considerar al ordenamiento territorial rural (OTR), como una disciplina que incluye procesos y herramientas orientadas al desarrollo sostenible (Ligier, 2009). El ordenamiento territorial rural es una expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales y

ecológicas de la sociedad. En síntesis, simplificarlo representa un proceso y una herramienta de planificación técnica y política que sirve para prevenir conflictos y solucionar desequilibrios territoriales (Ligier, 2009).

## 1.2 Antecedentes

A partir de la década del '90 se comienza a hablar de desarrollo sustentable y visión ecosistémica. Existiendo enfoques que requieren de organización y participación social en la solución de problemas comunes. Es por ello que Damiano (2017), presenta a la cuenca como un espacio idóneo donde interactúan los sistemas físico-bióticos y socio-económicos. De esta manera propone que la calidad y cantidad de agua representan importantes indicadores del estado de conservación de la cuenca. Además, propone que el manejo de cuencas tienda a orientarse no solo a la captación de agua, sino también a enfoques como los de protección de recursos naturales, mitigación del efecto de fenómenos naturales extremos (inundaciones y sequías), los de control de erosión hídrica y el control de la contaminación.

Tomando a la erosión hídrica como indicador del estado de conservación de una cuenca Rodríguez Vagaría y Gaspari (2014), realizaron la estimación cuantitativa de erosión hídrica superficial con SIG, mediante la aplicación del modelo Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS), definiendo además la tolerancia máxima admisible de pérdidas de suelo en una cuenca del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Del mismo modo Besteiro y Gaspari (2012), modelaron la emisión de sedimentos de una cuenca con forestaciones en la llanura pampeana, generando como resultado mapas georreferenciados de los distintos factores intervinientes en la EUPS. Así también, Bauni et. al. (2015), generaron mapas de uso de la tierra y cobertura de la tierra de imágenes de satélite Landsat del año 1987 y 2011, en la zona de influencia de la represa hidroeléctrica Yaciretá, donde se cuantificó la pérdida y cambio de la naturaleza en los ecosistemas antropogénicos en el periodo estudiado. Ligier (1997), identificó procesos de degradación de variada intensidad, vinculados a factores como ser las propiedades físicas y químicas de la capa arable de series de suelos que integran la cuenca del arroyo Santa María, influenciados por la topografía, el drenaje y la posición en el paisaje, además del factor climático vinculado a la erosividad de las lluvias.

Para considerar a la cuenca hídrica como un espacio idóneo para llevar a cabo cualquier evaluación, es fundamental conocer su morfometría. Es por ello que la primera descripción detallada de los diferentes aspectos de la cuenca completa del Estero y Río Riachuelo en Corrientes, y sus principales características topográficas, hidrológicas e hidráulicas fueron

desarrolladas por Ministerio de Defensa (DIGID, 1973). Luego, se llevó a cabo el Estudio Hidráulico – Hidrológico del Estero del Riachuelo y Anteproyecto de obras de Saneamiento, Provincia de Corrientes (1999). Así también, el estudio de la Factibilidad de la Extensión de Canales de Saneamiento en la Cuenca del Arroyo Santa María, abordó la Evaluación Hidrológica e Hidráulica y permitió conocer el funcionamiento y las propiedades hidráulicas de la cuenca (HIDROYET, 2011).

Conocer la problemática de un sitio de estudio desde sus bases es imprescindible para llevar a cabo una correcta toma de decisiones en planificación y ordenamiento del territorio. Por ello, el grupo de Recursos Naturales de la EEA-INTA-Corrientes (2017), generó los Aportes al Plan de Ordenamiento Territorial en el Municipio de Lomas de Vallejos, departamento de General Paz y en el Municipio de Itá Ibaté, departamento de Berón de Astrada.

El objetivo del trabajo fue evaluar y categorizar la pérdida de suelos generados en la cuenca del arroyo Santa María, el estudio consistió en estimar la pérdida de suelo e identificar las áreas con riesgo de erosión hídrica, mediante la aplicación de la EUPS con la técnica de álgebra de mapas en la cuenca mencionada. La información generada ayudará a la toma de decisiones en planeación y gestión de acciones territoriales para la conservación y recuperación de suelos en las diferentes tipos y usos de suelos evaluados. Todo con el propósito de reducir la degradación de los suelos de la cuenca.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GENERAL

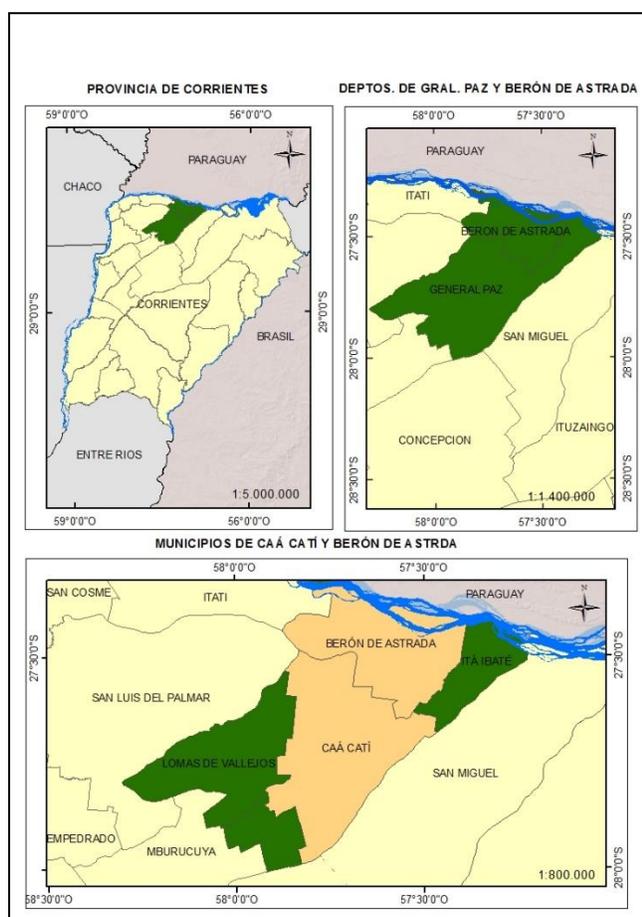
Establecer recomendaciones focalizadas en el uso y manejo de suelos para la Cuenca del arroyo Santa María que contribuyan a una planificación sostenible como apoyo al ordenamiento territorial.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Cuantificar la Pérdida de suelo superficial por erosión hídrica, la estabilidad de agregados y el Índice de Fertilidad Global según usos predominantes.
- Determinar y categorizar la relación de dichos parámetros con el uso y cobertura del suelo de la Cuenca.

### 2.3 Área de estudio

El presente estudio de tesis se realizó en el Centro Norte de la Provincia de Corrientes, abarcando el Municipio de Berón de Astrada con 89.311 hectáreas perteneciente al departamento de Berón de Astrada y el Municipio de Caá Catí con 122.639 hectáreas, pertenecientes al departamento de General Paz. La región de trabajo se encuentra entre los paralelos 27°21' y 28°00' de latitud sur y los meridianos de 57°28' y 57°50' de longitud oeste (Figura 1). Ocupando un área de 211.950 hectáreas entre ambos municipios. Seleccionándose estos municipios debido a que contienen la totalidad del área correspondiente a la cuenca del arroyo Santa María, cuyos límites no están claramente definidos.



**Figura 1:** Área de Estudio, Municipio Caa Catí- Departamento de Gral. Paz y Municipio Berón de Astrada-Departamento de Berón de Astrada, Provincia de Corrientes. Elaboración propia en base al mapa de Municipios provisto por Grupo de Recursos Naturales, EEA, INTA, Corrientes.

### 3 HIPOTESIS DE TRABAJO

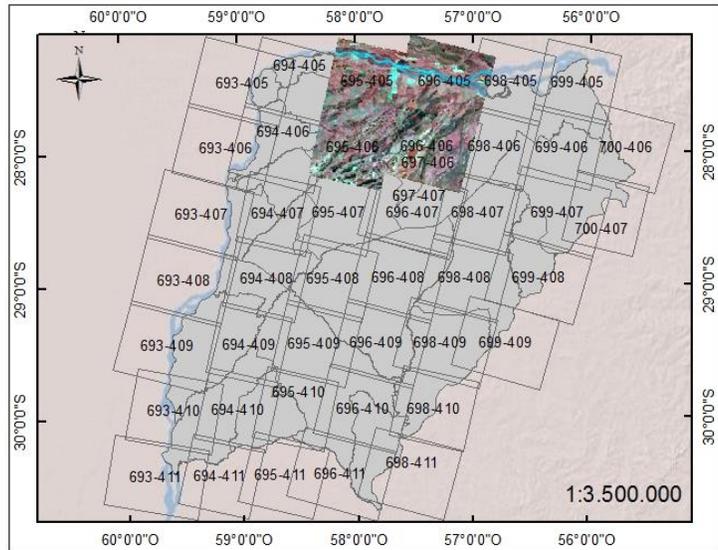
- La predicción de la degradación de los suelos, validada por trabajos de campo y herramientas SIG, constituye una estrategia para el manejo integrado los suelos de un sistema “cuencas”.
- Los diferentes usos y manejo de los suelos de la cuenca influyen de manera directa sobre la estabilidad estructural, el contenido de carbono orgánico, el índice de fertilidad global y la erodabilidad de los mismos.

### 4 MATERIALES Y METODOS

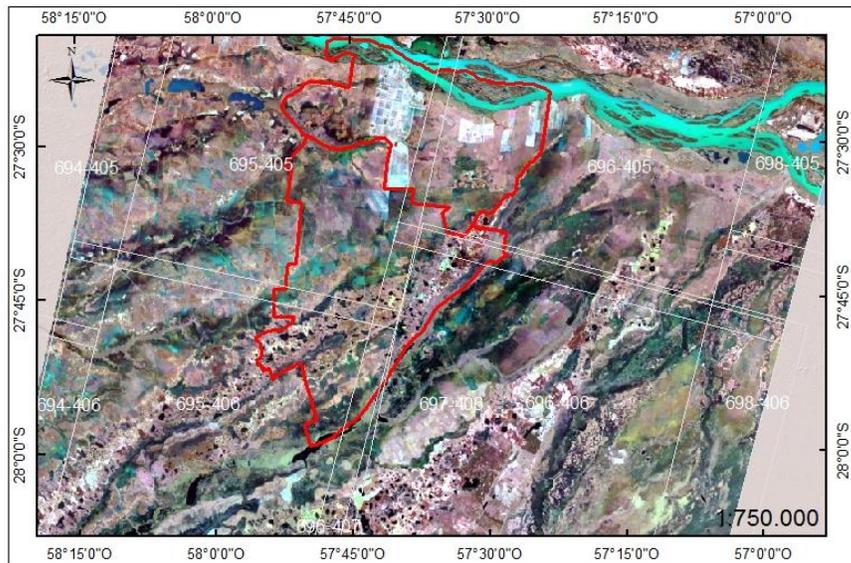
#### 4.1 Delimitación de la cuenca

Para el uso y manejo de información geográfica existente y generación de nueva información se empleó el software ArcGis v 10.0® de ESRI. Para el procesamiento de imágenes satelitales se procedió con el software ERDAS IMAGINE (2011).

Las imágenes de satélite utilizadas fueron las SPOT 5, que a través de un convenio entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), fueron adquiridas por el Grupo de Recursos Naturales, de la Estación Experimental Corrientes. Estas tienen una resolución espacial de 10 x 10 metros. Las imágenes utilizan una grilla mundial en el que se identifica de forma unívoca por un path (franja vertical) y un row (fila horizontal). Los path y row utilizados para crear el mosaico de imágenes en esta tesis fueron los 696 –405, 696 –406, 695 – 406, 695 – 405 y 697 – 407. El procesamiento digital y el análisis visual se realizó una combinación de las bandas B1 (Verde): 500 – 590 nanómetros, la B2 (Rojo): 610 – 680 nanómetros, la B3 (Infrarrojo cercano): 790 – 890 nanómetros y la B4 (Infrarrojo medio): 1580 – 1750 nanómetros. (Figura 2).

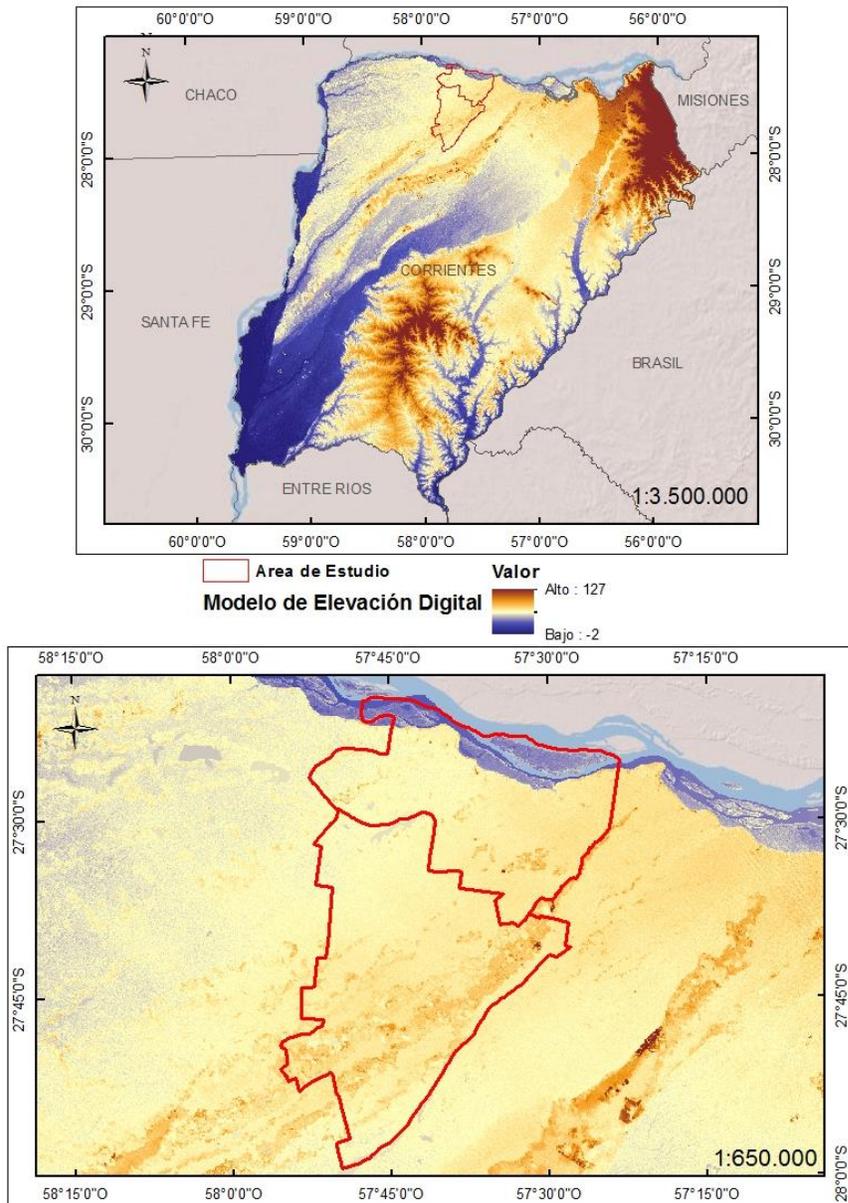


Path & Row imagenes SPOT año 2013  
 Area de Estudio



**Figura 2:** Imágenes del satélite SPOT 5, necesarias para el abarcamiento del área de estudio, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí.

El Limite de Cuenca se confeccionó a partir del procesamiento de cartas topográficas a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), del mosaico del Modelo de Elevación Digital (MED) STRM con resolución espacial de 30 metros, confeccionado para la provincia de Corrientes (Figura 3), contando con apoyo en los mapas digitales de red vial Nacional, Provincial y caminos vecinales. Toda la información fue brindada por el Grupo de Recursos Naturales de la Estación Experimental Corrientes del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).



**Figura 3:** Mosaico del Modelo de Elevación Digital Shuttle Radar Topography Mission (STRM) de la Provincia de Corrientes, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí.

#### 4.2 Caracterización general de la cuenca

La caracterización de una cuenca está dirigida fundamentalmente a cuantificar todos los parámetros que describen su estructura física y territorial.

Las características fisiográficas de una cuenca hidrográfica pueden ser explicadas, mediante el procesamiento de la información cartográfica y topográfica de la zona de estudio (Gaspari et. al. 2010).

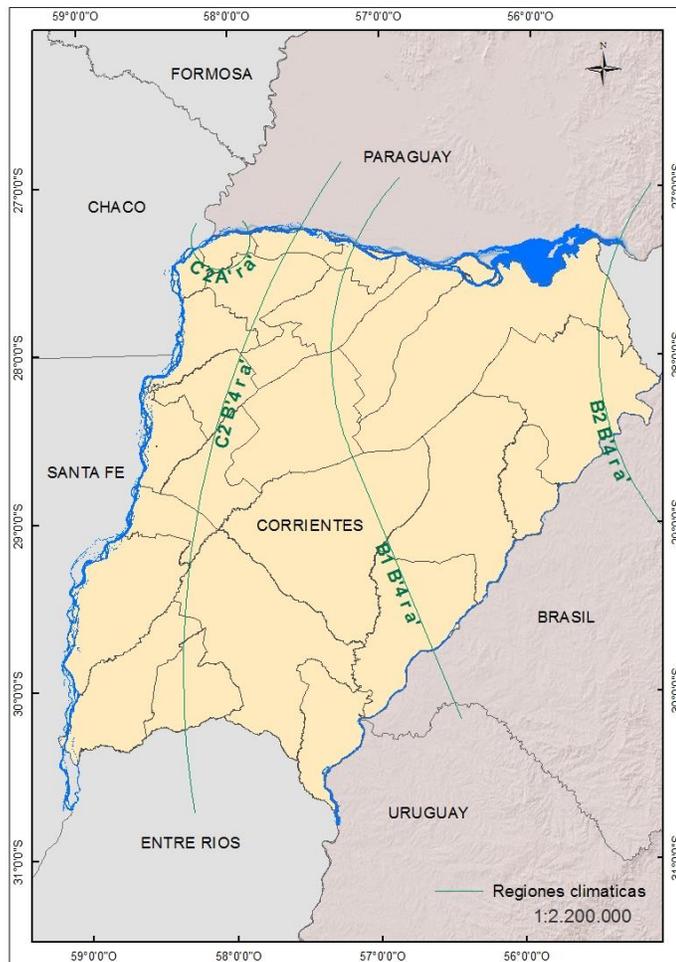
#### 4.2.1 Clima

Para la determinación del clima de la cuenca hídrica en estudio se utilizó la clasificación climática propuesta por Charles Warren Thornthwaite y adaptada a la provincia de Corrientes por Castro et. al. (1991), dividiéndola en regiones (Figura 4), según diferentes tipos climáticos, designados por coeficientes de la siguiente manera:

- El primer término de estos coeficientes designa el tipo climático que corresponde a las regiones hídricas, combina las precipitaciones efectivas y la evapotranspiración. Las regiones se dividen de Oeste a Este, de subhúmedo, con déficits hídricos (C2), a húmedo, sin déficits, con distintos excesos hídricos (B1; B2 y B3) (Escobar et al. 1996).
- El segundo término corresponde a la variación estacional de la eficiencia hídrica o índice de aridez, donde (r); indica una pequeña o casi nula deficiencia de agua en cualquier estación del año.
- El tercer término, refiere al índice de eficiencia térmica, considerando la evapotranspiración potencial., como función de la temperatura y la duración del día.
- El cuarto término es la concentración estival de la eficiencia térmica, bajo esta clasificación, toda la provincia posee una eficiencia térmica menor al 48% (a'), que indica que todos los meses (descartando los meses del verano), poseen temperaturas aptas para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Los tipos climáticos en la provincia son:

- C<sub>2</sub> A' r a' en zona de Paso de la Patria,
- C<sub>2</sub> B'<sub>4</sub> r a' en la franja longitudinal paralela al río Paraná,
- B<sub>1</sub> B'<sub>4</sub> r a' en la franja longitudinal central,
- B<sub>2</sub> B'<sub>4</sub> r a' en la franja NE de la provincia
- B<sub>3</sub> B'<sub>4</sub> r a' en un sector muy pequeño en el límite con la provincia de Misiones.



**Figura 4:** Regiones climáticas de Corrientes (Castro et. al. 1991).

#### 4.2.2 Precipitación

La cuenca del arroyo Santa María presenta carencia en el registro de datos pluviométricos actuales, debido a que no se cuenta con una serie de datos continua, por lo que se utilizaron datos de precipitación media mensual de la estación meteorológica del Municipio de Caá Catí, departamento de General Paz, Corrientes, pertenecientes a una serie del año 1970 hasta 1995 inclusive. Con esta serie se obtuvo la precipitación media anual y las precipitaciones medias mensuales.

#### 4.2.3 Temperatura

Los datos de temperatura fueron adquiridos a través de la casilla meteorológica automática Nimbus THP, id: 427, ubicada en S -27.75, W -57.62, Caá Catí, Corrientes, perteneciente al Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA2) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Extraídos de <http://www.siga2.inta.gov.ar>.

Los registros pertenecen al periodo del año 2014 hasta el 2017, obteniéndose así la temperatura media anual y la temperatura media mensual del área de estudio.

#### 4.2.4 Red hidrográfica

La red hidrográfica fue digitalizada, con apoyo de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional escala de trabajo 1:100000 cm, capas de curvas de nivel generadas a partir de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional escala de trabajo 1:100000 cm y mosaico de imágenes SPOT 5 del año 2013, en base al recorte del modelo de elevación digital.

#### 4.2.5 Red vial

La red vial se re-digitalizó utilizando la cartografía digital del Instituto Geográfico Nacional. Se recortó la capa de red vial Nacional y Provincial utilizando como base de recorte el límite de la cuenca del arroyo Santa María. Los caminos vecinales y privados fueron digitalizados sobre el mosaico de imágenes SPOT 5 del año 2013, los cuales fueron corroborados y corregidos a campo mediante navegadores satelitales.

#### 4.2.6 Morfometría

La caracterización de una cuenca se inició con la delimitación de su territorio y continuó con la obtención de “parámetros morfométricos” como la superficie, pendiente, forma, red de drenaje, entre otros.

La morfometría permite conocer las formas y medidas de las cuencas, y con ellas identificar y/o conocer el grado de desarrollo geomorfológico. El análisis morfométrico expresa las características físicas de una cuenca mediante el estudio de las particularidades de superficie, relieve e hidrografía, que permite realizar comparaciones con otras cuencas y ayuda a entender

el complejo de su funcionamiento hidrológico y las consideraciones necesarias para su manejo (Aguirre, 2007), para modelar hidrológicamente el movimiento y la captación del agua de lluvia.

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella; sin embargo, la poca información cartográfica de la que se dispone hace que el encontrar esa relación no sea fácil y que por lo tanto, su uso en estudios hidrológicos sea limitado (Gaspari et. al. 2010).

#### 4.2.6.1 Parámetros de Forma

La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas de igual superficie y formas diferentes se espera un comportamiento hidrológico también diferente. La medición de los factores de forma de una cuenca se realiza por medio de una metodología que permite cubrir dos objetivos. El primero, es que compara la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas; el segundo, es que confronta los resultados de las mediciones, los cuales son adimensionales, con los obtenidos en otras cuencas en las que se puede tener más información histórica de su comportamiento hidrológico (Gaspari et. al. 2010).

##### 4.2.6.1.1 Perímetro (P)

Es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas, su unidad de medida es el kilómetro. Es la distancia que habría que recorrer si se transitara por la divisoria de aguas de la cuenca. El Perímetro de la cuenca es un parámetro importante, pues en conexión con el Área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca.

##### 4.2.6.1.2 Área (A)

Es la superficie encerrada dentro de las divisorias de aguas, se mide en kilómetros cuadrados (o hectáreas). El Área de cuenca tiene gran importancia por constituir el criterio de la magnitud del caudal, ya que, en condiciones normales los caudales crecen a medida que crece dicha área (Londoño Arango, 2001). La relación del Área de una cuenca con la Longitud de esta es proporcional y está inversamente relacionada a aspectos como la densidad de drenaje.

#### 4.2.6.1.3 Longitud axial (La)

Se entiende por Longitud de cuenca a la longitud de una línea recta con dirección “paralela” al cauce principal. Dado que por lo general el cauce principal no se extiende hasta el límite de la cuenca, es necesario suponer un trazado desde la cabecera del cauce hasta el límite de la cuenca, siguiendo el camino más probable para el recorrido del agua precipitada. Se mide en kilómetros.

#### 4.2.6.1.4 Ancho promedio (Ap)

Es la relación que hay entre la superficie de la cuenca con su longitud axial, se mide en kilómetros (Ecuación 1).

$$\frac{A}{La} = Ap \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Ap: Ancho promedio (km)

A: Área (km<sup>2</sup>)

La: Longitud axial (km)

#### 4.2.6.1.5 Factor de forma (IF)

Este tiene correlación con la concentración del escurrimiento superficial. Una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas. Este es un factor adimensional, que además expresa la tendencia de la cuenca hacia las crecidas (Ecuación 2).

Así las cuencas con factor de forma bajo, son menos propensas a tener crecidas intensas y simultáneas sobre su superficie, en comparación con un área de igual tamaño, pero con un factor de forma mayor. Cuando el índice de forma es igual a la unidad la cuenca es de forma redondeada, y cuando es menor a la unidad, las cuencas son de forma alargada.

$$IF = \frac{Ap}{La} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

IF: Factor de forma

Ap: Ancho promedio (km)

La: Longitud axial (km)

#### 4.2.6.1.6 Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Es un índice adimensional que permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esa característica (Gaspari et. al. 2010) (Ecuación 3). El coeficiente de compacidad está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca (Gaspari et. al. 2010).

$$Kc = \frac{0,28 * P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P: Perímetro (Km)

A: Superficie (Km<sup>2</sup>)

Según los valores del coeficiente la cuenca tendrá la siguiente forma:

KC<sub>1</sub> = 1,00 cuenca redonda

KC<sub>2</sub> = 1,25 cuenca oval redonda

KC<sub>3</sub> = 1,50 cuenca oblonga

KC<sub>4</sub> = 1,75 cuenca rectangular oblonga

Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca. A medida que su Kc tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto

a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto, mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Gaspari et. al. 2010).

Los parámetros de forma fueron tomados y calculados en base a Gaspari *et. al.* 2010 (Manual de Manejo de Cuencas Hidrográficas).

#### 4.2.6.2 Parámetros de Relieve

##### 4.2.6.2.1 Modelo de Elevación Digital del Terreno

El modelo de elevación digital de la cuenca se consiguió haciendo un recorte del mosaico del modelo de elevación digital (MED) STRM con resolución espacial de 30 metros, confeccionado para la provincia de Corrientes (Figura 4), mediante herramientas de geoprocreso del software ArcGis v 10.0® de ESRI.

##### 4.2.6.2.2 Curva Hipsométrica

Está definida como la distribución del área de acuerdo a su elevación, lo que permite obtener la relación hipsométrica ( $R_h$ ) de la cuenca, la cual es calculada a partir del análisis altitudinal correspondiente al límite de la cuenca. Relaciones hipsométricas cercanas a la unidad indican cuencas en equilibrio o de madurez evolutiva, relaciones hipsométricas de menor valor a la unidad, indican cuencas sedimentarias o de vejez evolutiva y al contrario sucede con relaciones hipsométricas mayores a la unidad, donde las cuencas poseen un alto poder erosivo. Para determinar este parámetro se utilizó el “Método de Áreas Elementales” (Beltrán y Rosales, 2012), el cual determina que la altura media es la medida ponderada de todas las alturas correspondientes a áreas elementales. Primeramente, se delimitaron las áreas parciales de la cuenca desde la curva topográfica o curva de nivel más baja hasta la más alta, a intervalos de 5 metros (Beltrán y Rosales, 2012). Una vez obtenidas las áreas parciales y con la ayuda del software Excel 2013, se realizó la curva hipsométrica.

##### 4.2.6.2.3 Altura Media (h)

La altura media es la altura definida por el volumen de la cuenca en relación con la superficie de la misma (Ecuación 4).

$$h = \frac{\sum(h_i * A_i)}{A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

H= Altura media de la cuenca (m).

A<sub>i</sub>= Área parcial entre curvas de nivel sucesivas (km<sup>2</sup>).

h<sub>i</sub> = Altitud media entre curvas de nivel sucesivas (m)

A= Área total de la cuenca (km<sup>2</sup>)

#### 4.2.6.2.4 Pendiente Media de la Cuenca (PM)

Para calcular este parámetro se utilizó el software ArcGis 10, con el cual se realizó un mapa de pendientes en base a las curvas de nivel, el cual posteriormente fue interpolado obteniendo así el valor de la pendiente media de la cuenca.

Según López Cadenas del Llano, (1998) los rangos de pendientes medias dependen a los diferentes tipos de relieves, como se expone en la tabla 4.

**Tabla 2:** Rangos y tipos de pendientes, según (López Cadenas de Llano, 1998).

Pendientes medias (%)	Tipo de relieve
0 – 0,5	Muy Plano
0,5 – 1	Plano
1 – 3	Suave
3 – 12	Lomadas
12 – 20	Accidentado
20 - 35	Fuerte
35 – 50	Muy fuerte
50 – 75	Escarpado
Mayor a 75	Muy escarpado

#### 4.2.6.2.5 Coeficiente de rugosidad

Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca y su densidad de drenaje, su valor es adimensional (Ecuación 5).

$$Ra = \frac{H}{Dd} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Ra: Coeficiente de rugosidad

H: Diferencia de altura entre el punto más alto al más bajo (m)

Dd: Densidad del drenaje (km/km<sup>2</sup>)

#### 4.2.6.2.6 Coeficiente orográfico (Co)

Es la relación entre la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal.

Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, que crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Es adimensional. Combina dos variables esenciales del relieve, su altura que influye en la energía potencial del agua y el área proyectada, cuya inclinación ejerce acción directa sobre el escurrimiento de las precipitaciones (Ecuación 6).

Para poder hallar el Co, es necesario antes conocer el coeficiente de masividad.

$$\tan \alpha = \frac{h}{A} \quad \text{Ecuación 6}$$

*tan de  $\alpha$*  = Coeficiente de Masividad

h= altura media de la cuenca

A= área de la cuenca

Una vez que se dispone del coeficiente de masividad, podemos calcular el Co (Ecuación 7).

$$Co = h * \tan \alpha \quad \text{Ecuación 7}$$

Co= Coeficiente orográfico

tg  $\alpha$ = Coeficiente de Masividad

h= altura media de la cuenca

Los parámetros de Relieve fueron tomados y calculados en base a Gaspari *et. al.* 2010 (Manual de Manejo de Cuencas Hidrográficas)

#### 4.2.6.3 Parámetros Relativos a la Red Hidrográfica

##### 4.2.6.3.1 Densidad de drenaje (Dd)

Es la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma (Lopez Cadenas de Llano, 1998). Cabe recordar que se denomina red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el cual fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales. Se considera que la densidad de drenaje caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca. Además, define el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante, los cuales permiten el escurrimiento (Gaspari *et. al.* 2010) (Ecuación 8).

Esta permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión (Ibáñez Asensio *et. al.* 2011).

$$Dd = \frac{Ln}{A} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Dd: Densidad del drenaje (km/km<sup>2</sup>)

Ln: Sumatoria de las longitudes de todos los drenajes de la cuenca (Km)

A: Superficie (km<sup>2</sup>)

Una densidad de drenaje alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación. Una cuenca con baja densidad de drenaje refleja un área pobremente drenada, con respuesta hidrológica muy lenta (Londoño Arango, 2001).

En sitios donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión o muy permeables, y donde el relieve es suave, se presentan densidades de drenaje bajas. Los valores altos de la densidad de drenaje reflejan, generalmente, áreas con suelos fácilmente erosionables o relativamente impermeables, con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

#### 4.2.6.3.2 Cauce principal: Pendiente media

Es el curso con mayor caudal de agua o bien con mayor longitud. Tanto el concepto de río principal como el nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre el río principal y afluente (Ordoñez Gálvez, 2011).

La Pendiente media del cauce (J) se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud de este (Gaspari et. al, 2010). Se expresa en porcentaje según la siguiente Ecuación 9.

$$J = \left( \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

J: Pendiente media del cauce %

H max: Cota máxima sobre el curso de agua (m)

H min: Cota mínima sobre el curso de agua (m)

L: Longitud del río más largo (m)

Al aumentar la pendiente aumenta la velocidad del agua por la red hidrográfica, haciendo más susceptible a la cuenca a procesos erosivos y al arrastre de materiales. Este parámetro permite evaluar el potencial para erosionar, a partir de la velocidad del flujo, lo cual nos ayuda entender el comportamiento en el tránsito de avenidas.

#### 4.2.6.3.3 Tiempo de concentración (Tc)

Es el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana en viajar hasta el punto emisor. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca (Ecuación 10). Este parámetro tiene estrecha relación con el gasto pico y con el tiempo de recesión de la cuenca, tiempos de concentración muy cortos tienen gastos picos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan gastos picos más atenuados y recesiones mucho más sostenidas en el tiempo.

$$T_c = 0,3 \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración

L: Longitud del cauce (Km)

J: Pendiente media del cauce %

Los parámetros Relativos a la Red Hidrográfica fueron tomados y calculados en base a Gaspari *et. al.* 2010 (Manual de Manejo de Cuencas Hidrográficas).

#### 4.2.7 Sociocultural

Para conocer la población de la cuenca, nivel de educación, centros de salud, condición de ocupación de la población y las necesidades básicas insatisfechas (NBI) se utilizó información generada durante del Censo de Población y Vivienda del 2010 para la provincia de Corrientes (INDEC, 2010), específicamente para el municipio de Caá Catí y del municipio de Berón de Astrada.

#### 4.2.8 Económica - Productiva

En el área de estudio los principales sistemas productivos están basados en la actividad ganadera, forestal, agrícola y fruti-hortícola.

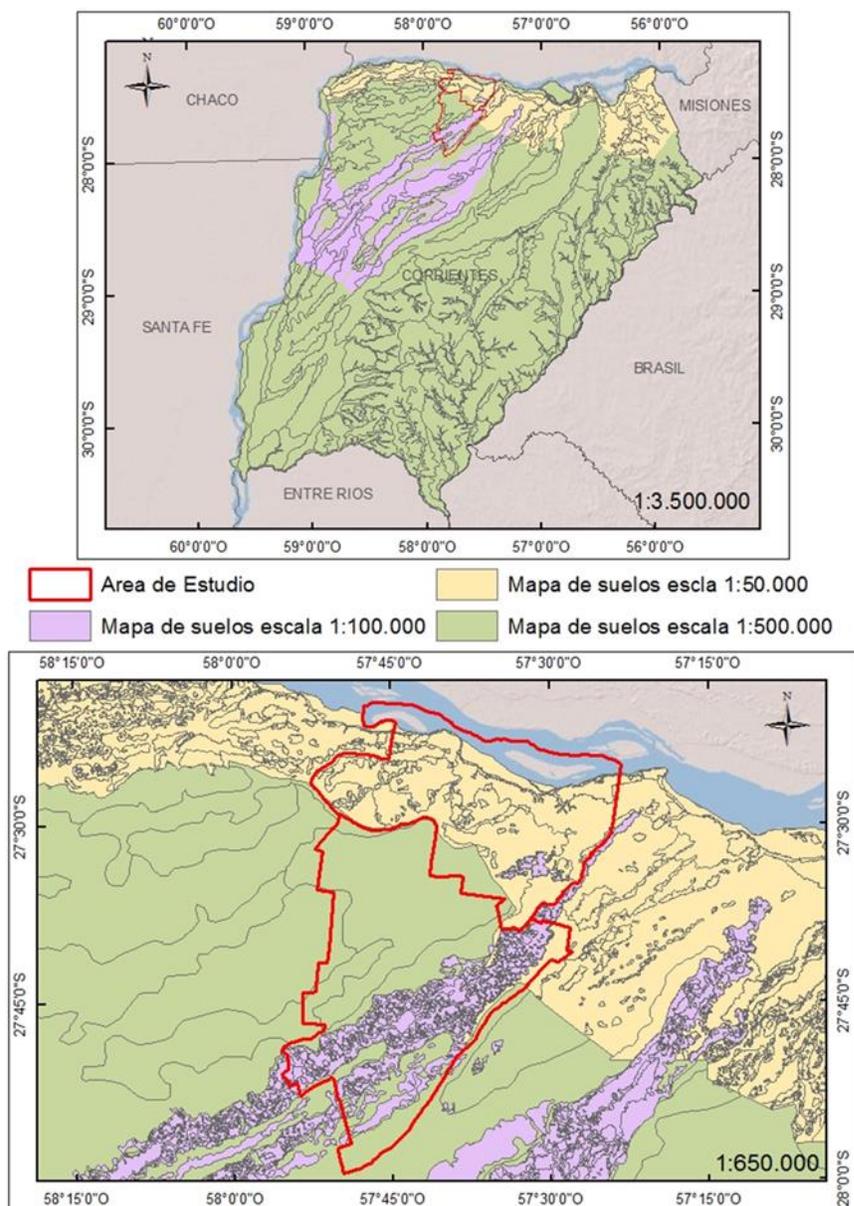
- La actividad ganadera: está principalmente representada por la ganadería de cría extensiva bovina y bubalina (Kurtz *et. al.* 2007, 2015), se desarrolla históricamente ambientes semi-naturales, tanto en tierras altas, como bajas, casi exclusivamente sobre pastizales naturales, y en menor medida sobre pasturas cultivadas (*Brachiaria* sp). Con la innovación y la adopción de tecnologías de insumos y procesos (conservación de forrajes, control de cargas en los campos, servicios estacionados, controles sanitarios, mejoramiento genético, etc.), se favorecen el aumento de terneros al destete, se promueve una mejor reposición de vientres generando continuidad al ciclo productivo; que permite incursionar en sistemas mixtos, dando lugar a la recría e invernada, logrando la venta de animales de distintas categorías.
- La actividad forestal está enfocada en la producción de especies introducidas, principalmente pinos y eucaliptos. Las densidades y marcos de plantación también

dependen directamente de los sistemas adoptados, de la genética y de la calidad de madera deseada. Los más utilizados son 4 x 3 y 4 x 2,5 m, obteniendo densidades de 833 y 1.000 plantas.ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Saiz et. al. 2014). Actualmente se ha logrado mediante avances genéticos la producción de híbridos, mejorando la calidad maderera, forma del fuste, ramosidad, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y volumen final; lo que significa mejor productividad por unidad de superficie y disminución de edades a turnos de corta para esquemas de manejo intensivo.

- La actividad arrocera se desarrolla principalmente en el sector norte del área de estudio (Kurtz, 2016). Los niveles de manejo utilizados son medios y altos e incluyen desde laboreos convencionales hasta los de mínima labranza. Dentro de estos esquemas mejorados cabe destacar la implementación del sistema “Nivel Cero” y reducción del periodo de riego, junto con el uso de altura mínima de lámina de agua haciendo más eficiente el uso del recurso hídrico. La época de siembra comienza al inicio de primavera, con cosechas tempranas antes de períodos lluviosos, lo que facilita el ingreso a los lotes. En general los rendimientos promedios para el área de estudio rondan los 6.000 a 7.000 kg.ha<sup>-1</sup>. Las fuentes de riego utilizadas principalmente son las superficiales, como río Paraná, arroyos y algunas lagunas (Marín, 2016).
- La horticultura pesada es la más desarrollada en la zona, encontrándose con mayor frecuencia lotes comerciales de mandioca, zapallos y sandías. En menor escala, a nivel de huertas familiares la producción de verduras de hojas frescas se torna muy importante, debido al abastecimiento que se da en centros turísticos cercanos como los departamentos. de Itá Ibaté e Ituzaingó. La producción de horticultura bajo invernáculos plásticos no está muy representada en la zona.

#### 4.3 Suelos

Se digitalizó el mapa de suelos de la cuenca del arroyo Santa María, a escala 1:50.000, utilizando imágenes satelitales, modelo de elevación digital y cartografía de suelos existente, a diversas escalas tomadas como base para la reducción de escala (Escobar et. al., 1983; Escobar et. al., 1996; Ligier et. al., 2014) (Figura 5). Además, se realizó una descripción completa de las unidades cartográficas y corroboración a campo haciendo observaciones puntuales.

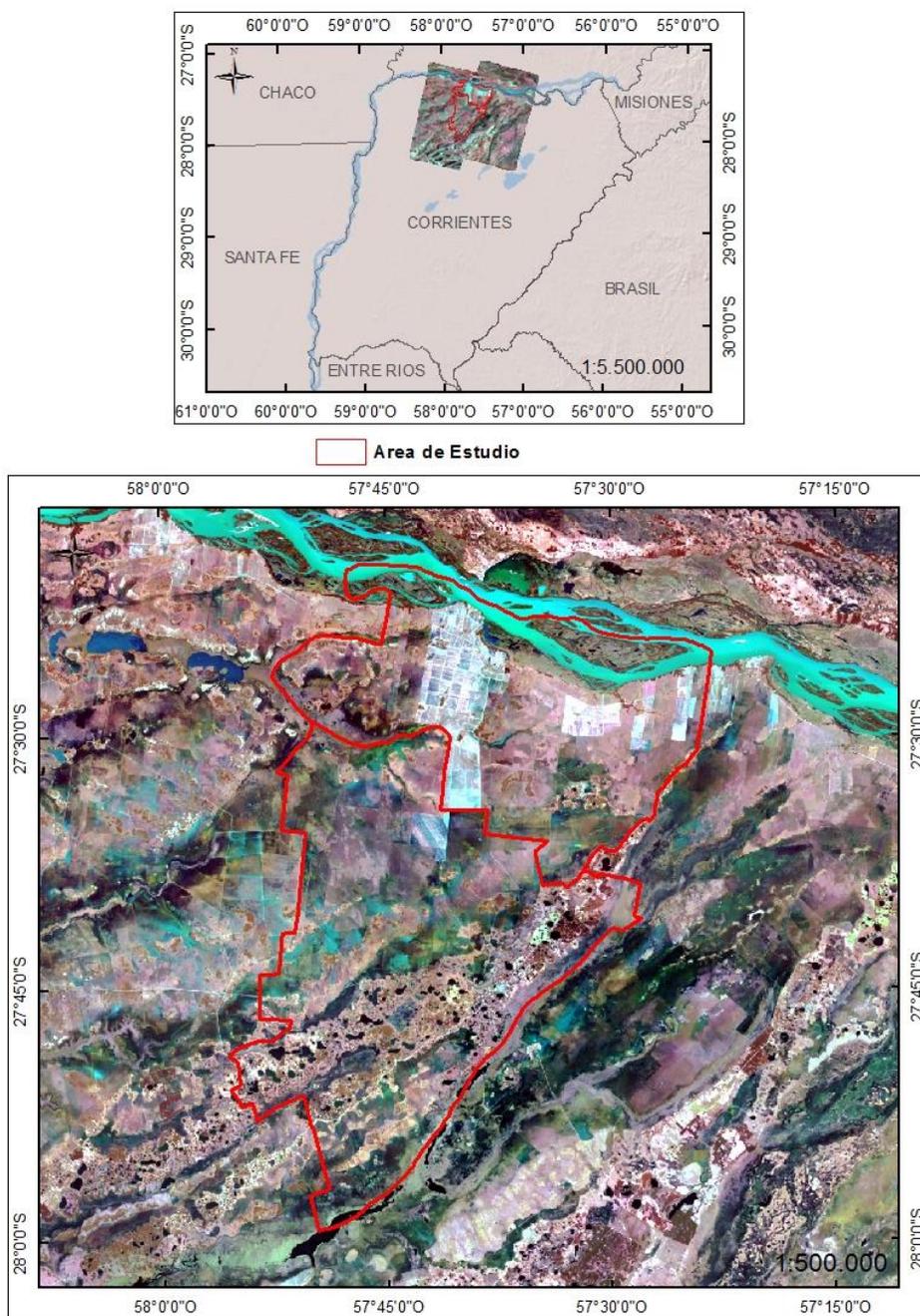


**Figura 5:** Mapas de suelos base de la digitalización del mapa de suelos de la cuenca del arroyo Santa María, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí.

#### 4.4 Uso del suelo de la Cuenca del Arroyo Santa María

La digitalización de usos de suelos se realizó por medio de la interpretación de un Mosaico de imágenes satelitales SPOT 5, del mes de noviembre del año 2013 (Figura 6). La digitalización se basó en la radiación reflejada en función de la longitud de onda, creando de esta manera, polígonos individuales, que en conjunto constituyeron el mapa de uso de suelos.

Los controles de campo se realizaron siguiendo transectas trazadas en cercanía a caminos de fácil acceso vehicular con un equipo GPS conectado a una notebook, utilizando la herramienta GPS Tool del Quantum GIS versión 2.8.1.



**Figura 6:** Mosaico de imágenes satelitales SPOT 5, noviembre del 2013, delimitando las áreas correspondientes a los municipios de Berón de Astrada y Caá Catí.

La selección de sitios se realizó mediante la superposición del mapa de suelos (a escala 1:50.000) y del mapa de usos del año 2013, identificándose 21 sitios a evaluar. En la tabla 3 se pueden apreciar los usos encontrados en cada serie de suelo Tomándose como serie principal a la serie con mayor representación de cada unidad cartográfica. Seleccionando las series donde se encontró más de un uso, dando la posibilidad de comparación entre usos para cada serie evaluada.

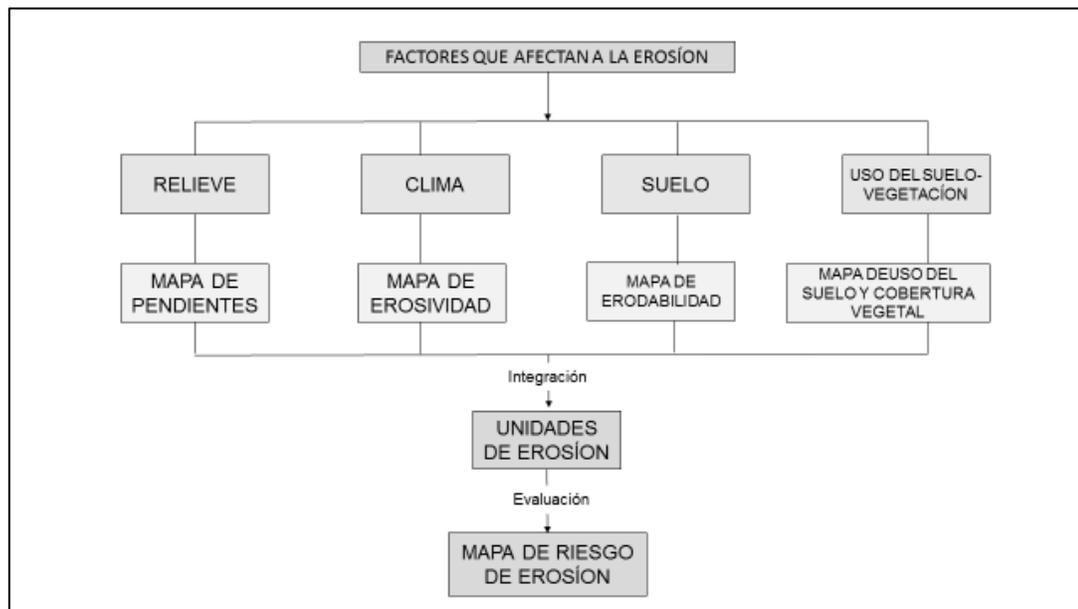
**Tabla 3:** Sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Historia del lote
Berón de Astrada (Eutrudeptes lamélicos)	Bosque Nativo	<i>Bosque con pastoreo y pisoteo animal</i>
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	<i>5 años desde siembra-implantación. Antes Pastizal natural con pastoreo</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>
	Mandioca	<i>Historia del lote 1 año de agricultura convencional</i>
	Forestación	<i>Historia del lote primer ciclo de plantación de Eucaliptus grandis. Edad de plantas 3 años. Densidad de plantas 500/ha, densidad inicial 700 plantas/ha</i>
Chavarría (Psamacuntes típicos)	Pasturas ( <i>Brachiaria</i> )	<i>1 año desde siembra-implantación. Antes pastizal natural con pastoreo</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>
	Bosque Nativo	<i>Bosque con pastoreo y pisoteo animal</i>
Chequín (Endoacualfes típicos)	Arroz	<i>Historia agrícola de 50 años. Lote con nivelación 0 Pendiente y siembra directa hace 2 años</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>
Loreto (Hapludalfes típicos)	Forestación	<i>Historia del lote segundo ciclo de plantación de Eucaliptus grandis, edad de plantas 5 años, densidad inicial de plantas 700 plantas/ha</i>
	Maíz	<i>Historia agrícola de 50 años. Monocultivo de maíz, labranza convencional</i>
	Pasturas ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	<i>5 años desde siembra-implantación. Antes Pastizal natural con pastoreo</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>
Tataré (Albacualfes típicos)	Arroz	<i>Historia agrícola de 50 años. Lote con nivelación 0 Pendiente y siembra directa hace 2 años</i>
	Forestación	<i>Plantación de Eucaliptus grandis segundo ciclo (rebrote)</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>
Timbó Paso (Natracuoles típicos)	Arroz	<i>Historia agrícola de 50 años. Lote con nivelación 0 Pendiente y siembra directa hace 2 años</i>
	Bosque Nativo	<i>Bosque sin intervención animal (islotos dentro de la chacra de arroz)</i>
Torres (Argiacuol abruptico)	Arroz	<i>Historia agrícola de 50 años. Lote con nivelación 0 Pendiente y siembra directa hace 2 años</i>
	Ganadería Extensiva	<i>Ganadería de cría bovina, 0,5 - 0,7 EV/ha</i>

#### 4.5 Erosión Hídrica Potencial

La erosión potencial o erosionabilidad hace referencia a la susceptibilidad a la erosión que se prevé va a tener lugar en el futuro bajo unas características geográficas y antrópicas determinadas.

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 (Ecuación 11). No se mide directamente, sino que se obtiene a partir de las variables que van a condicionar el proceso erosivo (Figura 7).



**Figura 7:** Esquema metodológico para la definición de paisajes erosivos. Fuente: (ICONA, 1982)

Se sabe que la erosión inducida por el hombre es función de factores físicos y humanos que pueden expresarse de la siguiente manera:

$$E = f(C, S, R, V, H) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

**E:** erosión.

**C:** agresividad climática.

**S:** susceptibilidad del suelo.

**R:** relieve.

**V:** cobertura vegetal.

**H:** acción antrópica.

Cuando quiere considerarse la Erosión Potencial de una zona, deben excluirse de la expresión los términos que hacen referencia a la acción directa o indirecta del hombre (H y V). Entonces la ecuación 12 expresa la nueva situación:

$$EP = f(C, S, R) \quad \text{Ecuación 12}$$

**EP:** Erosión Potencial.

Esta expresión se refiere a la erosión que existiría en un determinado lugar, sin acción del hombre y sin la cubierta vegetal protectora.

Los factores de erosión evaluados son: R, K, L, S, los que permiten estimar la **erosión máxima potencial teórica** para cada zona (Ecuación 13). Este valor representa la pérdida de suelo ( $Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ), que se produciría si el suelo se mantuviese arado a favor de la pendiente y sin ningún tipo de cobertura durante un año, expuesto a la acción erosiva de las lluvias. Este valor pone de manifiesto la susceptibilidad erosiva de cada zona o unidad.

#### 4.6 Pérdida de suelo potencial por erosión hídrica superficial en la Cuenca del Arroyo Santa María

El modelo EUPS (Ecuación Universal de Perdidas de Suelo) es un modelo matemático realizado por Wischmeier y Smith (1978).

El valor de pérdida de suelos por Erosión Hídrica Potencial obtenida ( $A_p$ ), es un término general que cuantifica un valor promedio anual, y es el más usado para fijar los efectos a largo plazo de la erosión sobre la productividad. Esta ecuación fue derivada por los autores, del análisis estadístico de datos obtenidos de 10.000 parcelas, afectadas por lluvia natural y entre 1.000 y 2.000 parcelas/año con lluvia simulada. Esta ecuación, evalúa principalmente la erosión laminar o erosión “entre surcos” (EES) y la erosión en surcos (ES) en forma conjunta, no así a la erosión por escurrimiento o “flujo concentrado”, cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, H. 1988).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo potencial se expresa en la Ecuación 13.

$$A_p = R * K * L * S \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$A_p$ : Pérdida de suelo por erosión hídrica potencial.  $Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ .

R: Erosividad de las lluvias, agresividad climática, o capacidad de las precipitaciones para producir erosión hídrica ( $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ ). Es el factor que representa a la variable lluvia, representa el Índice de erosividad o la capacidad erosiva de la lluvia y es el producto de la energía cinética y su máxima intensidad en 30 minutos ( $i_{30}$ ).

K: Erodabilidad del suelo o susceptibilidad a la erosión hídrica ( $K = Mg \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ). El factor susceptibilidad de erosión del suelo, es la tasa de pérdida de suelos por unidad, para un suelo específico, medido en una porción de terreno estándar (22,13 m de largo, 9% pendiente, en barbecho y labranza continua).

LS: Efecto de la longitud (L) y la pendiente (S) en las pérdidas de suelo.

L: El factor de largo de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m).

S: El factor de magnitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.

A continuación, se presenta la descripción metodológica para la determinación de cada factor.

#### 4.6.1 Factor R (erosividad de la lluvia)

Se recopilaron datos de precipitaciones mensuales históricas del Municipio de Caá Catí, Departamento de General Paz, comprendidos entre los años 1970 -1995, provistos por el Servicio Meteorológico Nacional. Para la obtención del factor R mediante la Precipitación Media Anual (PMA) se utilizó el modelo propuesto por Bianchi y Cravero (2010) (Ecuación 14).

$$R = 0,2266 \cdot PMA^{1,1289} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

R: Erosividad de la lluvia ( $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ )

PMA: Precipitación Media Anual (mm)

1,1289: Coeficiente empírico

#### 4.6.2 Factor K (erodabilidad de los suelos)

El factor K, fue calculado mediante la ecuación descrita por Wischmeier (Wischmeier et. al.1971), que es la razón entre la multiplicación del subfactor textura y subfactor materia orgánica (MO) y la suma de los subfactores adimensionales obtenidos en tablas de: Estructura (b) y Permeabilidad (c). La Ecuación 15 expresa su forma de determinación.

$$K = \frac{(([\% \text{ de limo} + \text{ Arena muy fina}) \cdot (100 - \% \text{ Arcilla})]^{1,14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - \text{MO}) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3))/100}{1.292} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Limo: partículas de suelo comprendidas entre 2 a 50  $\mu\text{m}$

Arena muy fina: partículas de suelo comprendidas entre 50 a 100  $\mu\text{m}$

Arcilla: partículas menores a 2  $\mu\text{m}$

MO: Materia Orgánica de los primeros 20 cm de suelo

*b*: Grado de estructura del suelo

- 1= Muy buena Estructura (granular muy fina)
- 2= Buena Estructura (granular fina)
- 3= Estructura Regular (granular media y bloques subangulares finos y medios)
- 4= Estructura Mala (laminar o masiva y bloques angulares)

*c*: Permeabilidad de suelo

- 1= Muy rápida, mayor a 12,5 cm/hora
- 2=Moderadamente rápida, de 6,25 a 12,5 cm/hora
- 3=Moderada, de 2 a 6,25 cm/hora
- 4=Moderadamente lenta, de 0,5 a 2 cm/hora
- 5= Lenta, de 0,125 a 0,5 cm/hora
- 6= Muy lenta, menor a 0,125 cm/hora

Se calculó la Erodabilidad de cada serie, luego se clasificaron según USDA (1962), tabla 5:

**Tabla 4:** Clasificación de la erodabilidad de suelos según (USDA, 1962), citado en (Amezquita, 1990).

<b>K (Mg.ha.h.ha<sup>-1</sup>.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Clasificación</b>
<0,0775	Muy poco erodable
0,0775 - 0,1680	Débilmente erodable
0,1680 - 0,3230	Medianamente erodable
0,3230 - 0,6784	Fuertemente erodable
0,6784 - 1	Extremadamente erodable

La representación gráfica del Factor K se realizó usando como base valores obtenidos mediante la ecuación 15, calculada en sitios evaluados. En el caso de las series y usos de suelos que no fueran evaluados, y estén dentro de los límites de la cuenca se utilizara valores de K publicados por (Ligier et.al. 1998).

Para incorporar estos valores al sistema de información geográfica para el área de la cuenca se utilizó Arc-Info™, zonificando el Factor K en la cuenca.

#### 4.6.2.1 Determinación de Subfactores de Erodabilidad (K)

Para estimar el valor de la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica (K de la ecuación 15) propuesta por Wischmeier et. al.1971, citada en (Ligier et. al. 1998, Rivera et. al. 2010, Cassol et. al. 2018), es necesario contar con información edáfica específica.

La materia orgánica, la textura, la permeabilidad y la estructura son subfactores medidos en cada serie de suelo, bajo diferentes usos representativos en la cuenca del arroyo Santa María, y con estos datos se determinó K.

#### 4.6.2.1.1 Materia orgánica

El muestreo se realizó por serie de suelos y uso en la cuenca, a una profundidad de 20 cm (Tabla 3). Se tomaron 5 réplicas, por cada sitio evaluado, obteniendo así un total de 90 muestras. La materia orgánica se determinó mediante autoanализador LECO.

#### 4.6.2.1.2 Textura

El análisis granulométrico busca cuantificar las fracciones texturales de los componentes minerales del suelo. La importancia de conocer la proporción de las distintas fracciones está relacionada a la capacidad de retención de agua, infiltración, tamaño de poros, capacidad de intercambio catiónico, etc.

El muestreo se realizó por serie de suelos y uso en la cuenca, a una profundidad de 20 cm (Tabla 3). Determinado así el tamaño de partículas presente en cada serie de suelo (Tabla 5).

**Tabla 5:** Fracción y diámetro granulométrico de partículas de suelos según USDA, 2000.

Fracción	Diámetro (mm)
Arena muy gruesa	2,00 - 1,00
Arena gruesa	1,00 - 0,50
Arena media	0,50 - 0,25
Arena fina	0,25 - 0,10
Arena muy fina	0,10 - 0,05
Limo grueso	0,050 - 0,020
Limo medio	0,020 - 0,005
Limo muy fina	0,005 - 0,002
Arcilla	< 0,002

Para determinar y cuantificar las fracciones texturales se utilizó el hidrómetro de Bouyoucos que se basa en la ley de Stocks, contemplando la relación lineal entre el diámetro de la partícula,  $X$ , y el inverso de la raíz cuadrada del tiempo (Ecuación 16).

$$X = \theta \cdot t^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde  $\Theta$  es un parámetro de sedimentación y es una función de la profundidad de asentamiento del hidrómetro, la viscosidad de la solución y la densidad de la partícula y la solución.

#### 4.6.2.1.3 Estructura del suelo

La estructura del suelo es el ordenamiento natural de las partículas del suelo en agregados debido a procesos pedogenéticos y de manejo (USDA 2000).

**Tabla 6:** Identificación de tipo y clase de Estructura. Tomado de (Schoeneberger, 2012).

Clase		Muy Fina	Fina	Media	Gruesa	Muy Gruesa
Tipo	Subtipo					
Agregados Poliédricos	Migajosa	<1	1 a 2	10 a 20	20 a 50	>50
	Semimigajosa					
	Granular					
	Bloques Subangulares	<5	5 a 10	10 a 20	20 a 50	>50
	Bloques angulares Irregulares					
	Bloques angulares Regulares					
	Bloques Aplanados					
	Bloques Cuneiformes					

\*Los valores de clase de Estructura se expresan en mm.

La determinación de tipo y clase de estructura fue realizada a campo de manera visual e interpretativa, para lo que se utilizó como guía el Libro de Campaña para Descripción y Muestreo de Suelos (Tabla 6) (USDA, 1998), traducido y publicado por el Instituto de Suelos (CIRN-INTA, 2000).

#### 4.6.2.1.4 Infiltración

La infiltración a campo se calculó con el método del anillo simple Michelena *et al* (2010). Se utilizaron los siguientes materiales:

- 1) Infiltrómetros de anillo simple de 29 cm de diámetro.
- 2) Botella de Mariotte de acrílica graduada en mm.
- 3) Plancha de acero para facilitar el ingreso del Infiltrómetros al suelo.

4) Base plástica para apoyo de la botella de Mariotte

5) Masa

6) Cronómetro

La tasa de infiltración se calculó utilizando la Ecuación 17, basada en la ecuación de Horton (1939).

$$I_t = \frac{lam\ acum_{t_2} - lam\ acum_{t_1}}{t_2 - t_1} \cdot 60 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$I_t$ : tasa de infiltración en función del tiempo ( $mm \cdot h^{-1}$ )

$lam\ acum_{t_2}$ : lámina infiltrada de agua acumulada al tiempo  $t_2$  (mm)

$lam\ acum_{t_1}$ : lámina infiltrada de agua acumulada al tiempo  $t_1$  (mm)

$t_2$  y  $t_1$ : tiempos 2 y tiempo 1 (segundos)

Posteriormente, los suelos de los sitios evaluados se clasificaron en base a su conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) (Tabla 7).

**Tabla 7:** Valor  $c$  (permeabilidad) de la ecuación del Factor  $K$  de la EUPS (erodabilidad), tomado de Irurtia *et al* (2007).

Valor de $c$	Clase de permeabilidad	Permeabilidad de la capa menos permeable (cm/h)
1	Rápida	> 12,5
2	Moderadamente Rápida	6,25-12,5
3	Moderada	2 - 6,25
4	Moderadamente Lenta	0,5 - 2
5	Lenta	0,12 – 0,5
6	Muy Lenta	< 0,12

#### 4.6.3 Factor topográfico: L (longitud de pendiente) y S (gradiente de pendiente).

La erosión aumenta conforme se incrementa la longitud del terreno (L) en el sentido de la pendiente y la inclinación de la superficie (S) se hace mayor (Figuroa *et al.* 1991).

Para obtener el factor adimensional longitud de la pendiente (L) se utilizó la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978) (Ecuación 18), siendo la distancia desde el origen del flujo superficial a lo largo de su trayectoria, hasta la ubicación de cualquier flujo concentrado o deposición. Para ello se utilizó el factor exponencial  $m$  de la ecuación propuesta por Foster *et al.* (1977) (Ecuación 19) y para determinar la relación de la erosión en surcos y entre surcos se utilizó la determinada por (McCool *et al.* 1989) (Ecuación 20).

Para incorporar las ecuaciones en un sistema de información geográfica y proyectar para el área de la microcuenca fue necesario aplicar la ecuación propuesta por (Desmet y Govers, 1996) (Ecuación 21) y para el ajuste en la variabilidad del ángulo de la pendiente fue aplicada la ecuación propuesta por (McCool *et al.* 1987) (Ecuación 22 y 23).

$$L = \left( \frac{(\lambda)^m}{20} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

L= longitud de pendiente (m)

$m$ = exponente de la Longitud de la pendiente

$\lambda$ = longitud de pendiente en m

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$\beta$ = relación de erosión de surcos y entre surcos

$m$ = exponente de la Longitud de la pendiente.

$$\beta = \frac{\sin\theta/0.0986}{3*(\sin\theta)^{0.8}+0.56} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde

$\Theta$ = ángulo de pendiente a nivel de pixel en radianes

$\beta$ = relación de erosión de surcos y entre surcos

De esta manera se obtuvo la longitud de pendiente para la coordenada  $ij$ , según Ecuación 21, determinada por (Desmet y Govers, 1996).

$$L = \frac{(A_{ij-in}+D^2)^{m+1}-(A_{ij-in})^{m+1}}{D^2*(X_{ij})^m*(22.13)^m} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

L= Longitud de pendiente

A= acumulación de flujo para un pixel

X= Coeficiente de forma, para sistemas pixelados adquiere valor de 1

D= Lado del pixel, para el caso del modelo de elevación digital utilizado Shuttle Radar Topography Mission (STRM) de 30 metros es igual a 29,17

$m$ = Exponente de la Longitud de la pendiente

Para incorporar las ecuaciones al Sistema de información geográfica para el área de la cuenca se calculó la pendiente a nivel de pixel. Se procedió a realizar un relleno del modelo de elevación digital de terreno de la siguiente manera:

ArctoolBox → Herramientas de Análisis Espacial → Hidrología → Relleno

Para luego calcular la pendiente a nivel de pixel  $\Theta$

ArctoolBox → Herramientas de Análisis Espacial → Superficies → Pendiente

Para el ajuste en la variabilidad del ángulo o gradiente de la pendiente fueron aplicadas las ecuaciones propuestas por (McCool et. al. 1987) (Ecuación 22 y 23).

$$S = 10.8 * \sin \theta + 0.3 \quad \text{Cuando } S = < 9\% \quad \text{Ecuación 22}$$

O

$$S = 16.8 * \sin \theta - 0.5 \quad \text{Cuando } S = \geq 9\% \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

S= gradiente de la pendiente (%)

Con el mapa LS en formato raster, se asignó un valor correspondiente a cada serie y uso de suelo. Utilizando Arc-Info™ se creó una cobertura de puntos a la cual se le construyó una topología. A cada punto creado, se asignó un valor extraído del mapa raster LS, generado anteriormente, mediante la función extraer del Arc tool box.

#### 4.7 Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica (EUPS) Actual en la Cuenca del Arroyo Santa María

El modelo EUPS (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo) es un modelo matemático realizado por Wischmeier y Smith (1978) para determinar las pérdidas de suelos en la cuenca se procedió con el producto de los factores EUPS (Wischmeier y Smith 1978), donde a los términos de la ecuación 24 para determinar Erosión Potencial máxima teórica se le adicionan los factores C y P.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{Ecuación 24}$$

**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.

Los valores de pérdida de suelo obtenidos se clasificaron según Ligier et.al. (1998).

**Tabla 8:** Clases de Erosión hídrica para la Provincia de Corrientes, tomado de Ligier et al. (1998).

CLASES	PERDIDAS DE SUELO	
	Mg* ha <sup>-1</sup> * año <sup>-1</sup>	CAPA ARABLE (cm)
Muy Baja	< 10	< 0,07
Baja	10 a 20	0,07 - 0,14
Moderadamente Baja	20 a 50	0,14 - 0,36
Moderada	50 a 70	0,36 - 0,50
Moderada Alta	70 a 110	0,50 - 0,78
Alta	> 110	> 0,78

#### 4.7.1 Factor C (cultivos y manejo del suelo)

Este factor indica el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo. Se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área o parcela con una vegetación dada y sistemas de manejo específicos, y la pérdida de suelo en una parcela en barbecho continuo, limpia y arada, en el sentido de la pendiente, a intervalos regulares Wischmeier y Smith (1978). Los valores de C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial, y viceversa; es decir, a mayor valor de C, menor es la cobertura del suelo, es decir, hay menor protección. Debido a que en la zona de la cuenca no se cuenta con valores reales del Factor C, se recurrió a publicaciones, de donde se tomaron valores para los usos y coberturas de suelos identificados en la cuenca.

#### 4.7.2 Factor P (prácticas de conservación de suelos)

El factor de prácticas de conservación de suelos expresa la influencia que ejercen las prácticas de cultivo, corrección y conservación de la erosión hídrica. La función de este valor es disminuir el valor de pérdida de suelo obtenido, suponiendo que existen o van a llevarse a cabo prácticas de conservación, tales como cultivos en fajas, aterrazados, etc. en el área de estudio. Se denominan también prácticas de contorno, e incluye cualquier tipo de obra, barrera vegetal o incluso la propia disposición de las especies vegetales plantadas o repobladas.

Algunas de estas prácticas de conservación de suelos pueden ser:

- Aterrazamientos en zonas de montaña, buscando disminuir la pendiente, favorecer la infiltración y reducir la velocidad de la escorrentía. Alternar especies poco densas con especies más densas en laderas de gran longitud.
- Cuando no existe ninguna medida de protección el valor Standard de P es igual a 1. A medida que se practican medidas de contorno el valor de P actúa como un atenuador del valor final de la erosión.

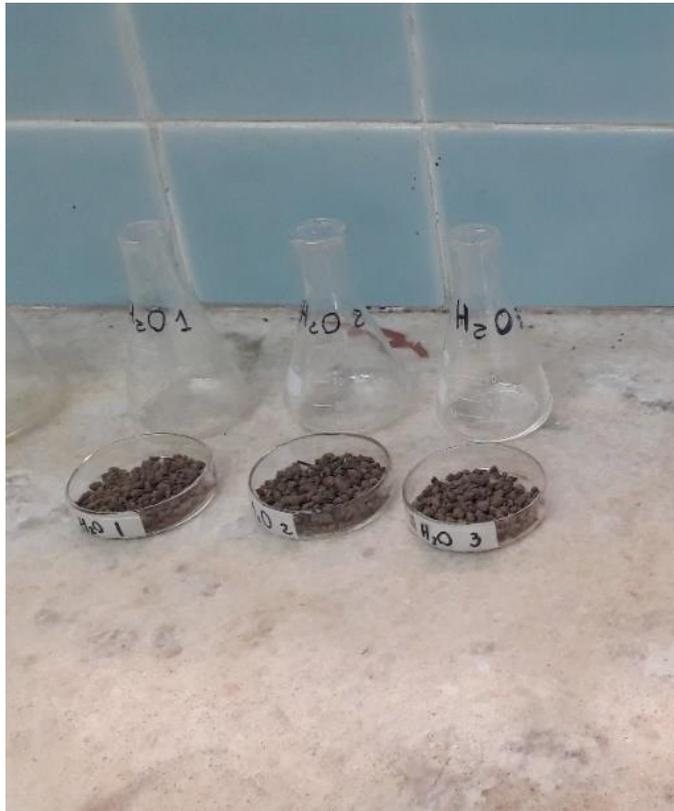
Debido a que en el cultivo de arroz se realiza la construcción de taipas, para facilitar el riego del cultivo posterior a la siembra, y los lotes evaluados se realizan en pendientes con niveles mínimos y teniendo en cuenta el momento de la evaluación (premacollaje), se consideró valores de cultivos de grano fino sembrados en directa, con terrazas. Asignando el valor de 0,2 al factor P para este cultivo.

Para el resto de la cuenca debido a que no se encontraron prácticas de conservación de suelos como ser cultivos en contornos, cultivos en franjas o cultivos en terrazas, se optó por considerar el valor de 1 para este factor.

#### 4.8 Determinación de la estabilidad estructural de los suelos

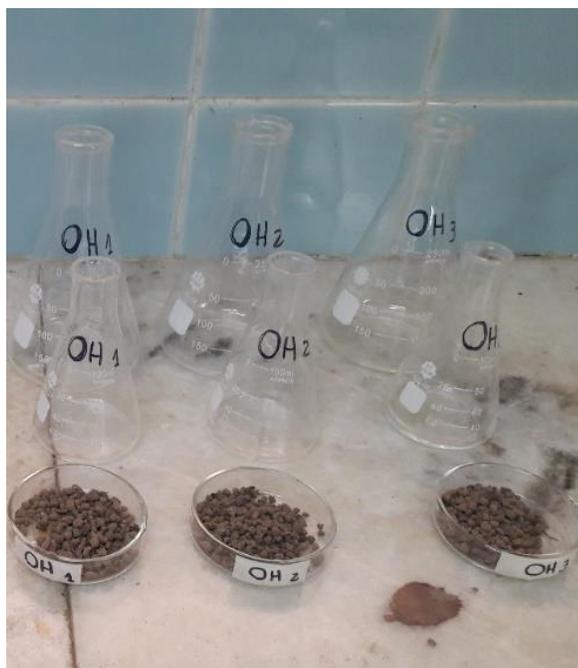
En este trabajo de tesis se utilizó el método de Le Bissonnais (1996) basado en el método de Henin, desarrollado por INRA de Francia. El método consiste en obtener el diámetro medio ponderado de agregados estables con tres pre-tratamientos: Humectación rápida (DMPe); disgregación mecánica, luego de re-humectación con etanol (DMPd) y humectación lenta por capilaridad (DMPc) y, con el promedio se determina un valor que sintetiza la información (DMPm). En general, la medición de la estabilidad estructural en laboratorio intenta reproducir alguno de los mecanismos de desagregación natural e inducidos.

El método utilizado consistió en someter muestras de 10 g de agregados de 3-5 mm, a tres tratamientos de laboratorio para el cálculo del diámetro medio ponderado de agregados estables (DMP) calculando el estallido de los agregados por humectación rápida, inmersión en agua o efecto estallido (DMPe) (Figura 8). Este tratamiento permite comprobar el comportamiento de los materiales sometidos a humectaciones repentinas, del tipo de irrigación por inmersión, o lluvias intensas, aunque en este último caso el choque o golpe de las gotas de lluvia juega un rol importante en la ruptura de los agregados.



**Figura 8:** Agregados preparados para humectación rápida, por inmersión en agua o efecto estallido (DMPe).

- Disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd) (Figura 9). Este pre-tratamiento permite comprobar el comportamiento de los materiales húmedos. La re-humectación previa tiene como objetivo constatar la cohesión de los materiales en el estado húmedo independientemente del estallido. Esta re-humectación sin estallido puede realizarse con la utilización de un líquido no polar y miscible en el agua, como lo sería el etanol en este caso (Henin et. al. 1958).



**Figura 9:** Disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (DMPd).

- Humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc) (Figura 10). Este tratamiento permite comprobar el comportamiento de los materiales secos o poco húmedos, sometidos a lluvias moderadas o de baja intensidad. Es menos destructivo que la humectación rápida, lo que permite discriminar los suelos con poca estabilidad.



**Figura 10:** Agregados preparados para humectación lenta con agua por capilaridad (DMPc).

- Medición de la distribución del tamaño de las partículas resultantes. La distribución de tamaño de agregados luego de la desagregación se realiza de manera idéntica mediante el tamizador FEODOROFF (Figura 11) y se explica detalladamente en el Anexo VI.



**Figura 11:** Tamizador FEODOROFF, columna de tamices para clasificación de agregados en seco >2.000  $\mu\text{m}$ , 2.000-1.000  $\mu\text{m}$ , 1.000-500  $\mu\text{m}$ , 500-200  $\mu\text{m}$ , 200-100  $\mu\text{m}$  y 100-50  $\mu\text{m}$ .

El resultado se expresa bajo la forma de diámetros medios ponderados. También puede calcularse la media de los tres diámetros medios ponderados para obtener un valor sintético (DMPm), o bien calcular las relaciones entre los diámetros medios ponderados de las diferentes pruebas para determinar la parte respectiva a cada uno de los mecanismos.

Los valores obtenidos serán clasificados teniendo en cuenta los valores y rangos de la Tabla 9 (Le Bissonais et. al. 2002).

**Tabla 9:** Valores de clasificación de Estabilidad de Agregados (Le Bissonnais et. al. 2002)

<b>DMPm</b>	<b>Estabilidad</b>
Menor a 0,4 mm	Muy inestable
0,4-0,8 mm	Inestable
0,8-1,3 mm	Medianamente estable
1,3-2 mm	Estable
Mayor a 2 mm	Muy estable

#### 4.9 Determinación del índice de fertilidad global

Para esta cualidad se evaluó la oferta de nutrientes en los primeros 20 cm del suelo, en donde para cada variable se utilizó una escala de 1 a 5 (mínimo y óptimo, respectivamente).

Para su cálculo se tienen en cuenta 5 propiedades edáficas: materia orgánica según texturas; pH; fósforo asimilable; capacidad de intercambio catiónico (CIC) y saturación de bases (V), estableciéndose para cada una de ellas 5 rangos cuyos valores críticos son determinantes para la producción agrícola, que define un valor de fertilidad que puede variar de 5 a 25, siguiendo la metodología presentada por (Ligier et. al. 1999) (Ecuación 25).

Donde:

$$IFG = Mo * P * CIC * V * pH \quad \text{Ecuación 25}$$

IFG: índice de fertilidad global

Mo: Materia Orgánica (%): valor teórico, utilizando el factor de Van Bemmelen (1,724) se basa en la aceptación de que la materia orgánica contiene 58% de Carbono orgánico.

P: Fósforo: por la metodología de Bray & Kurtz I (IRAM 29570-1), la concentración de fósforo fue expresada en ppm.

CIC: Capacidad de intercambio catiónico (T): se calculó mediante la suma de bases (S) + hidrógeno (H), expresado en  $\text{cmolc kg}^{-1}$ .

V: Porcentaje de saturación de bases: es el cociente entre bases intercambiables (S) y capacidad de intercambio catiónico (T). Expresando en porcentaje

pH: se analizó por el método potenciométrico, con una relación suelo: agua de 1:2,5.

Posteriormente se asignó un peso a cada valor de fertilidad, obteniéndose el Índice de Fertilidad Global (IFG).

**Tabla 10:** Propiedades edáficas y rangos asignados para el cálculo del IFG (Ligier et. al.1999).

		Valores asignados por rango				
		5	4	3	2	1
MO (%) según textura	T. fina	>3,5	2,6-3,5	1,6-2,5	1,5-1	<1
	T. media	>2,5	2,1-2,5	1,6-2	1,5-1	<1
	T. gruesa	>1,5	1,1-1,5	0,8-1	0,7-0,4	<0,4
P (ppm)		>15	10-15	10-7	3-7	<3
CIC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )		>20	16-20	11-15	5-10	<5
V (%)		>80	50-80	30-49	29-15	<15
pH		6,1-7,5	5,7-6	5,1-5,6	4,5-5	<4,5 >7,5

T. fina: más del 35% de arcilla. T. media: 10-35% de arcilla. T. gruesa: menos de 10% de arcilla.

Finalmente se establecieron tres niveles de fertilidad global (Tabla 11), según Ligier et.al. 2014.

**Tabla 11** Niveles de Fertilidad Global según Ligier et. al. (2014).

Nivel de Fertilidad Global	IFG
Bajo	5-11,9
Medio	12-18,9
Alto	19-25

#### 4.10 Pautas de Manejo Integrado de los recursos en la Cuenca del Arroyo Santa María

Para establecer las pautas de manejo sustentable de los recursos de la cuenca, se consideró a la misma como unidad de planificación y gestión. De esta manera las propuestas dictadas tienen el objetivo de conservar y mejorar el estado del suelo, controlar la erosión, regular la escorrentía, controlar sedimentos y proteger la calidad del agua de los afluentes.

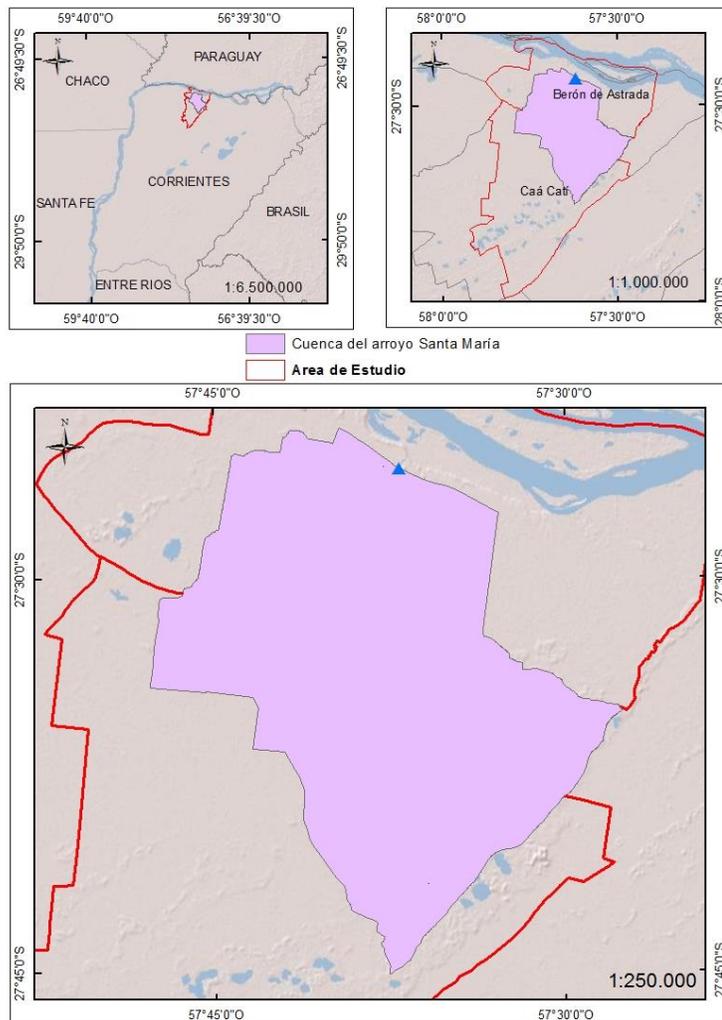
#### 4.11 Sistema Información Geográfica para la Cuenca del Arroyo Santa María

La información generada se volcará a un Sistema Información Geográfica (SIG) de consulta de acceso libre y gratuito, para optimizar la toma de decisiones de políticas públicas y productivas en la cuenca.

## 5 RESULTADOS:

### 5.1 Límite de cuenca o divisoria de aguas:

La cuenca del arroyo Santa María está ubicada mayormente en los municipios de Caá Catí y Berón de Astrada, pertenecientes a los departamentos de General Paz y Berón de Astrada respectivamente, provincia de Corrientes, Argentina (Figura 12). La misma posee una gran extensión, abarcando un área aproximada de 63.910 hectáreas. Su punto de aforo se encuentra ubicado en  $27^{\circ} 25' 83''$  S,  $57^{\circ} 37' 06''$  W. La topografía de la zona es muy plana, con muy bajas pendientes regionales, por lo que se puede decir que la cuenca presenta un comportamiento clásico de cuenca de llanura.



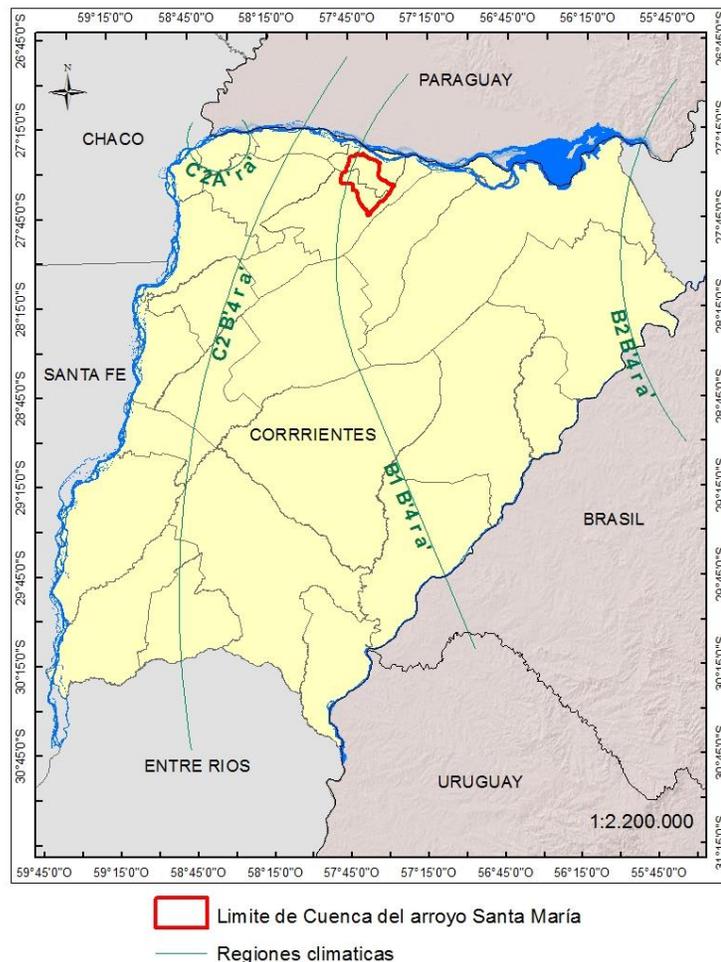
**Figura 12:** Limite de cuenca o divisoria de aguas de la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

## 5.2 Caracterización general de la Cuenca del Arroyo Santa María

### 5.2.1 Clima

La cuenca, se encuentra en una zona comprendida entre dos tipos climáticos: la franja longitudinal central (B1 B'4 r a') y la franja longitudinal centro-NE de la provincia (B2 B'4 r a') (Figura 13). La principal diferencia radica en que las precipitaciones aumentan levemente de oeste a este, pasando de un régimen húmedo a húmedo sin déficit.

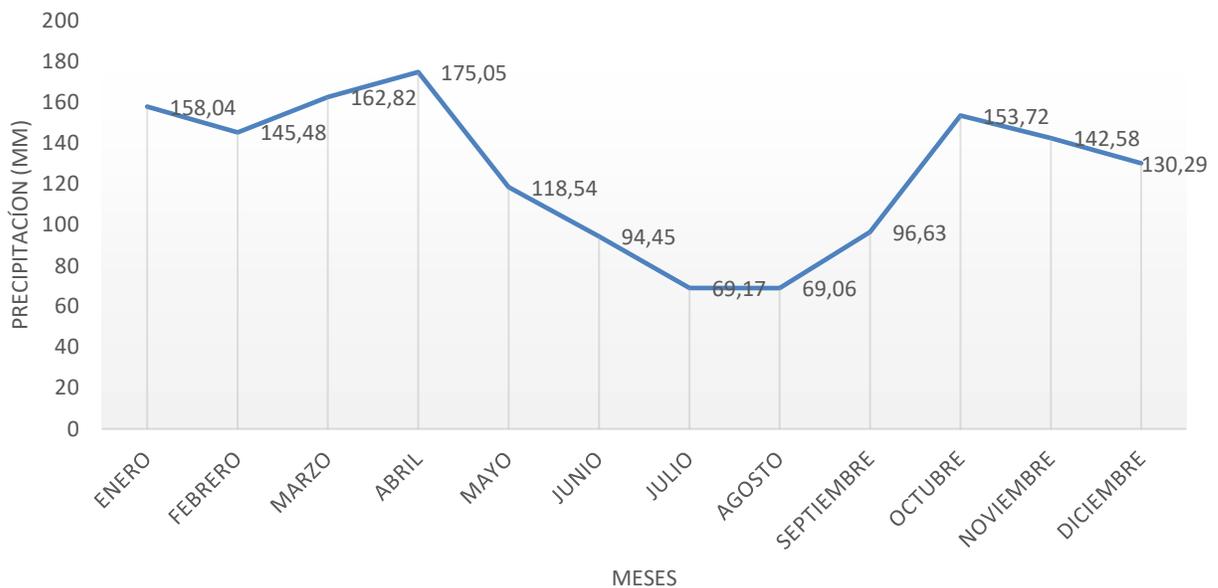
Según el sistema de KÖPPEN el área de estudio corresponde a un clima mesotermal, cálido templado, sin estación seca definida, con precipitaciones máximas en otoño y primavera y con veranos muy cálidos con temperaturas superiores a los 22 °C, una temperatura media anual de 18 °C, con un único subtipo que corresponde al más cálido (Cf w'a (h)).



**Figura 13:** Ubicación de la Cuenca del Arroyo Santa María en la zona climática (B1 B'4 r a') y (B2 B'4 r a') según KÖPPEN. Fuente elaboración propia.

### 5.2.2 Precipitación:

Los registros del período 1960-1995 arrojan una precipitación media anual de 1515,83 mm. En el período Mayo – Septiembre se registran los valores mínimos de precipitación, registrándose el menor valor (69,06 mm) para el mes de agosto y los máximos en el período Octubre – Abril, registrándose el mayor valor (175,05 mm) para el mes de abril (Figura 14).



**Figura 14:** Distribución media mensual de la precipitación departamento de Gral. Paz-Corrientes. Fuente: elaboración propia.

### 5.2.3 Temperatura:

Los registros el periodo 1960-1995 arrojan que la temperatura media anual de la región es de 21,49 °C. La evolución de la temperatura media mensual se presenta en la Figura 15. La temperatura media mensual máxima es de 26,95 °C correspondiente al mes de enero y el valor mínimo se presenta en el mes de junio con una media mensual de 16,1 °C.

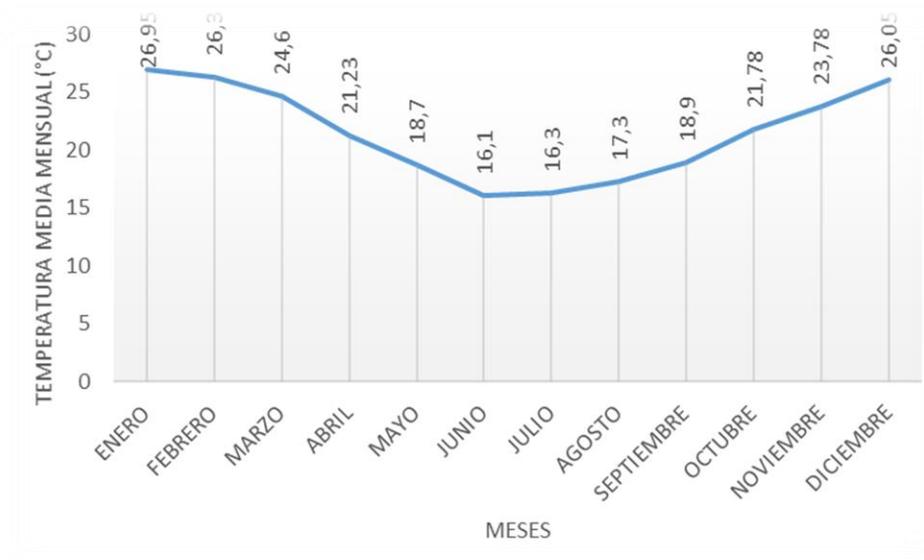


Figura 15: Temperaturas Medias Mensuales, periodo 1960-1995 del departamento Gral. Paz-Corrientes. Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.4 Red hidrográfica:

La red hidrográfica posee una longitud total de 156,3 km en total (Figura 16). Esta red está formada por el arroyo Noé, siendo el mayor afluente del arroyo Santa María, el mismo está compuesto por el arroyo Fortuna, el arroyo Caá Pitay y el canal Caá Catí. El otro tributario de importancia es el arroyo Sequeira, formado por el arroyo Timbó Cora y el arroyo Avalos o el Vizcaíno; junto a estos y en menor medida el aporte desde el canal de la Estancia “La Atalaya” (Tabla12). Además, se debe aclarar que la red hídrica se encuentra totalmente antropizada y modificada tanto en su distribución, como en la forma, presentando canalizaciones de los cuerpos de aguas, modificando la dinámica hídrica de toda la cuenca y de cuencas vecinas.

**Tabla 12:** Principales tributarios del arroyo Santa María

Red Hídrica por arroyo	Longitud (m)
Avalos o Vizcaíno	24258,9
Caá Piaty	12529,7
Noé	24349,5
Sequeira	18718
Timbo Corá	6463,4
Canal Caá Catí	39162,8
Fortuna	17742,9
Canal Atalaya	5053
Santa María	8103
TOTAL	156381,2

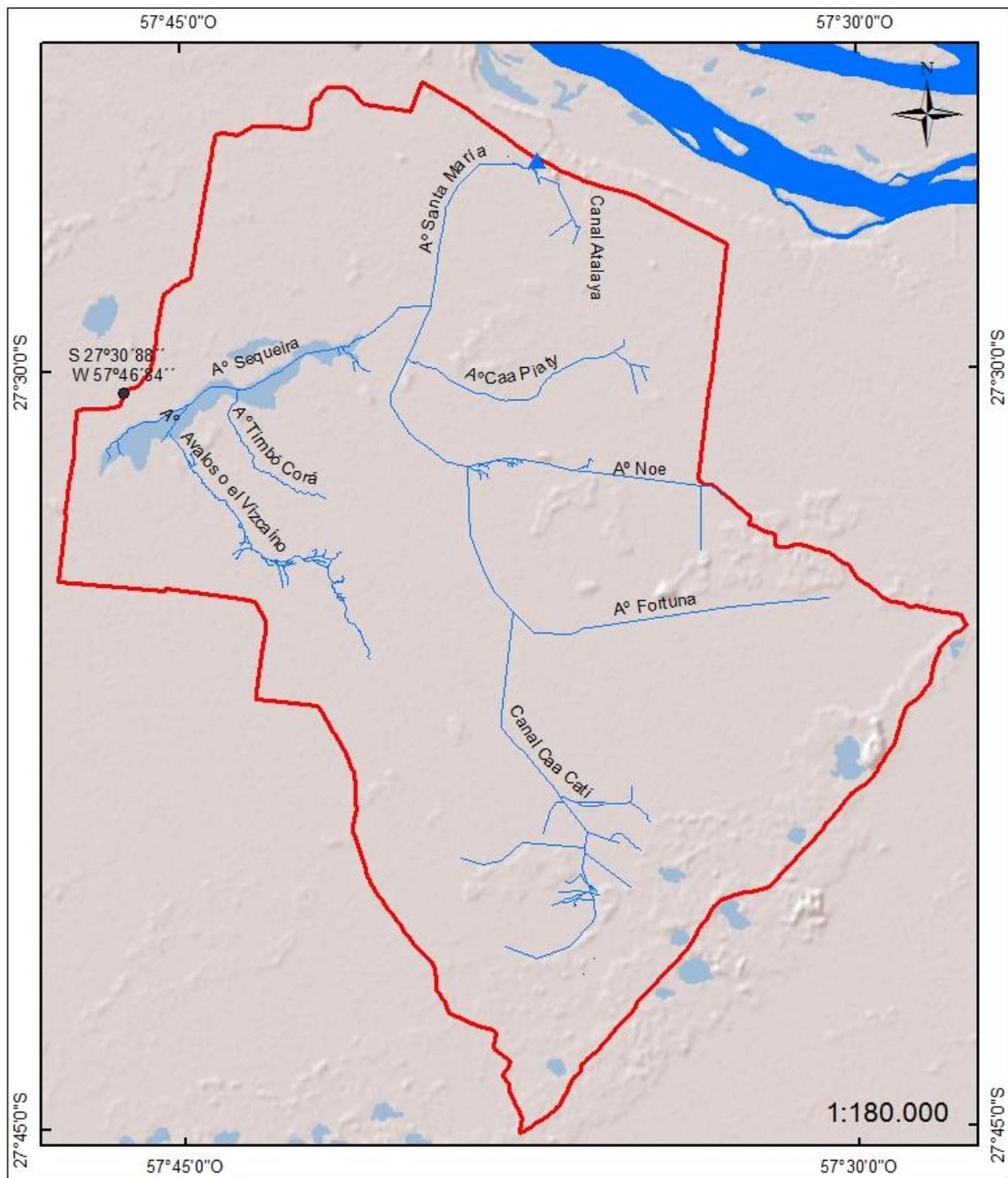


- Limite de Cuenca del arroyo Santa María
- Red Hidrica
- ▲ Punto de Aforo

Figura 16: Red Hidrográfica de la cuenca del arroyo Santa María año 2013. Imagen Satélite SPOT 5. Fecha de imagen septiembre 2013. Fuente: elaboración propia.

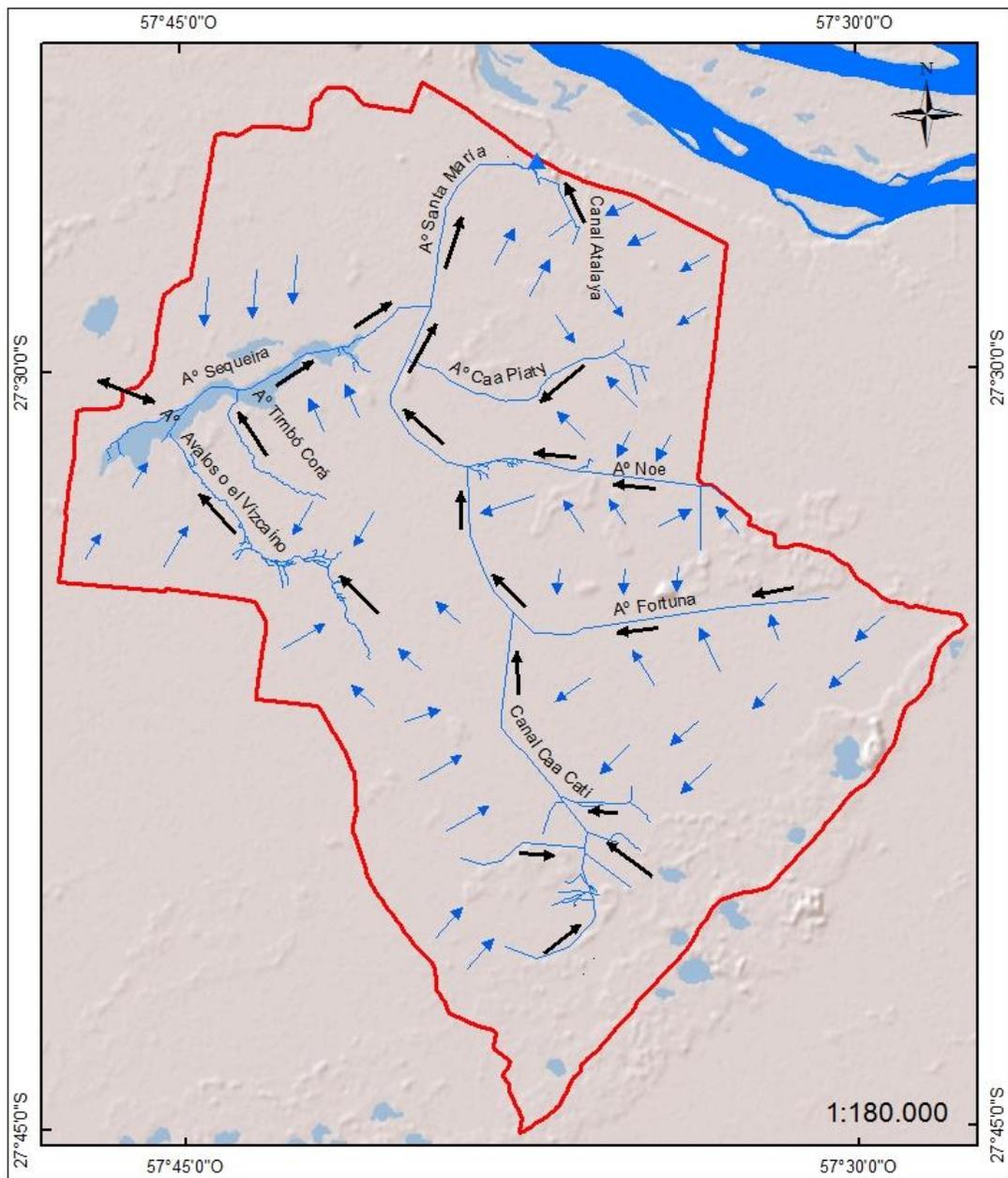
El escurrimiento superficial laminar se ve comprometido por la presencia de caminos y terraplenes, afectando de esta manera el normal funcionamiento de la red hídrica, alterándola a tal punto de influir en la dirección del flujo.

La construcción de canales y el encauzamiento de los cuerpos de aguas, altera la dirección de las masas de agua, cambiando totalmente el sentido natural de la dirección del flujo. Así sucede en el punto S 27°30'88'', W 57°46'84'' (Figura 17), donde la canalización del estero del arroyo Riachuelo, hace cambiar la dirección del flujo de oeste a este, aportando así al arroyo Sequeira (Figura 18).



- Limite de Cuenca del arroyo Santa María
- Red Hidrica 2013
- Dirección de Flujo Indefinido

Figura 17: Dirección de Flujo indefinido en la cuenca de arroyo Santa María. La georreferenciación S 27°30'88''; W 57°46'84'' indica el sitio donde ocurre el flujo indefinido. Fuente: elaboración propia.

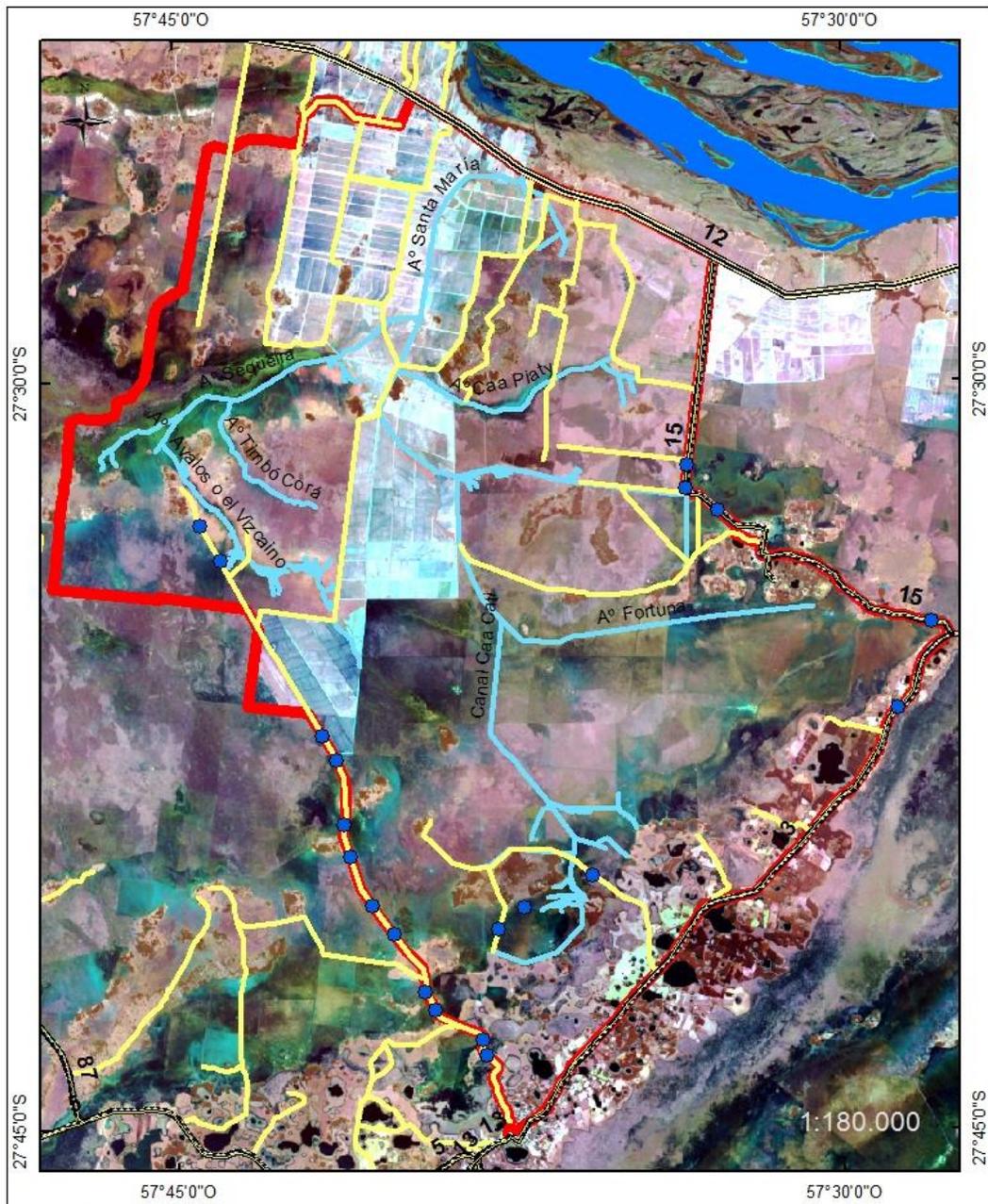


- Limite de Cuenca del arroyo Santa María
- Red Hidrica 2013
- ← E scorrimiento Laminar
- E scorrimiento Concentrado en Canales y Cauces

Figura 18: Dirección de Flujo Laminar y Flujo concentrado del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.5 Red vial:

La ruta Nacional N° 12 forma parte de la red vial de la cuenca, siendo esta asfaltada, lo mismo ocurre con el tramo de la ruta N° 15 que va desde la intersección con la ruta N° 12, hasta el municipio de Berón de Astrada. La otra ruta asfaltada es la ruta N° 5, mientras que la ruta N° 13, 87 y el tramo de la ruta 15 que une el municipio de Berón de Astrada con la ruta N° 13 son de ripio, todas de carácter Provincial. También se observa una red de caminos internos en el interior de la cuenca (Figura 19). La mayoría de los caminos son sobre-elevados con relación a nivel del suelo, provocando muchas veces el represamiento de los cuerpos de aguas, volviéndose así verdaderas divisorias de aguas en las cuencas de llanuras.



- Limite de Cuenca del arroyo Santa María
- Caminos Vecinales
- Represamientos causados por caminos
- Red Hidrica
- Rutas Nacionales
- Ruta Provinciales

Figura 19: Red Vial de la cuenca, Rutas Nacionales, Rutas Provinciales y caminos vecinales. En azul se identifican situaciones de represamiento de cuerpos de aguas causados por los caminos. Fuente: elaboración propia.

### 5.2.6 Morfometría:

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia.

#### 5.2.6.1 Parámetros de Forma:

##### 5.2.6.1.1 Perímetro

El perímetro de la cuenca del arroyo Santa María es de **120,6 km**

##### 5.2.6.1.2 Área:

El área de la cuenca del arroyo Santa María es de **639,1 km<sup>2</sup>**.

5.2.6.1.3 Longitud Axial (La): La longitud axial de la cuenca del arroyo Santa María es **30 km**.

##### 5.2.6.1.4 Ancho Promedio (Ap):

El ancho promedio de la cuenca del arroyo Santa María es de **21,28 km**

##### 5.2.6.1.5 Factor de forma:

El factor de forma de la cuenca del arroyo Santa María es de **0,56** apreciando una geometría alargada debido a su bajo índice de forma.

##### 5.2.6.1.6 Coeficiente de compacidad de Gravellius (KC):

El coeficiente de compacidad de la cuenca del arroyo Santa María es de **1,34**; por lo que pertenece a la clase **K2** que define la forma de la cuenca como oval – oblonga; correspondiéndose con una peligrosidad media de que se produzcan avenidas máximas.

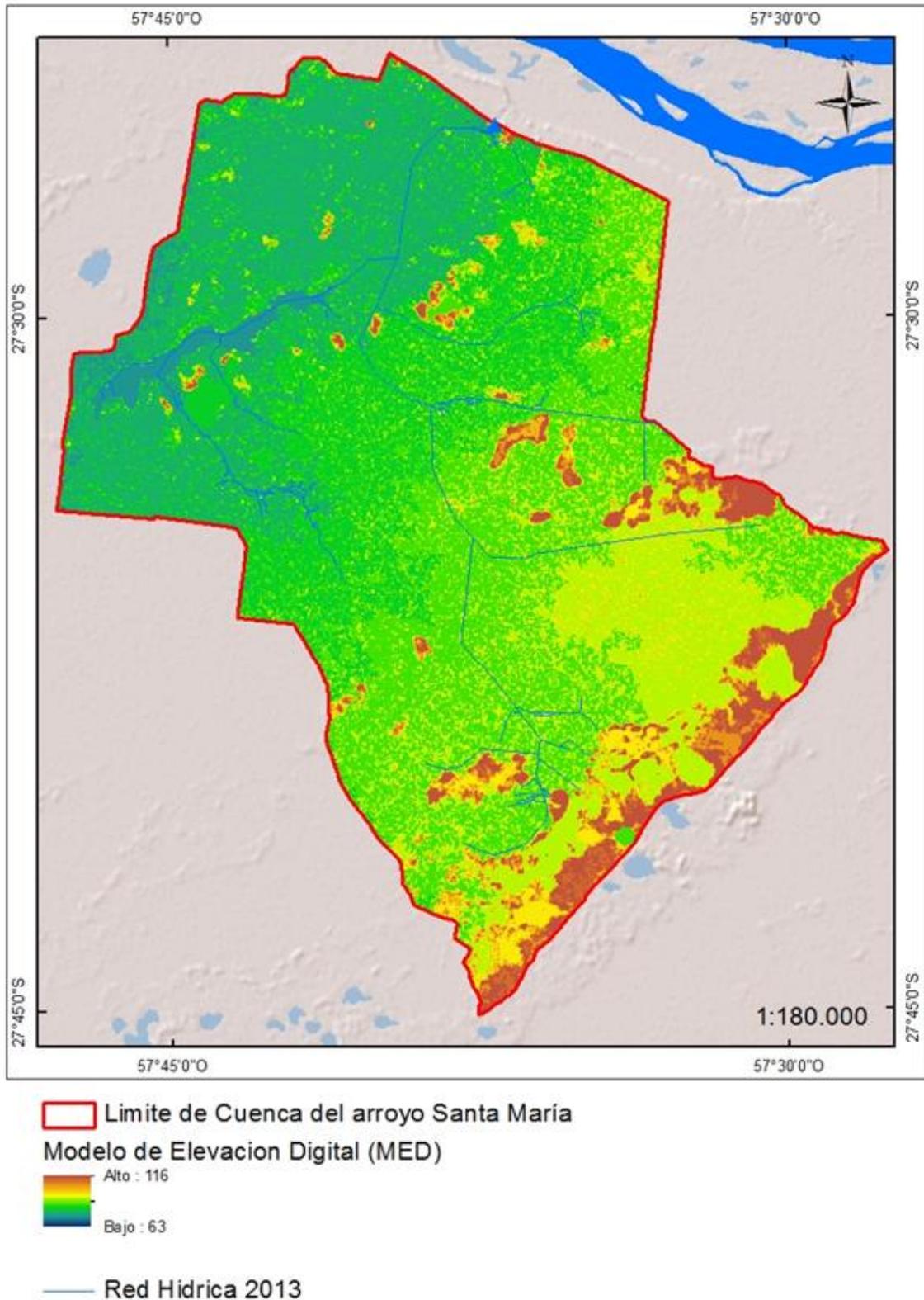
Tabla 13: Parámetros de Formas de la cuenca del arroyo Santa María

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Resultado</b>
Perímetro	kilómetro	120,6
Área	kilómetro cuadrado	639,1
Longitud Axial	kilometro	30
Ancho promedio	kilometro	21,28
Factor de Forma	adimensional	0,56
Coefficiente de Gravellius (KC)	adimensional	1,34

#### 5.2.6.2 Parámetros de Relieve:

##### 5.2.6.2.1 Modelo de Elevación Digital (MED) de la cuenca

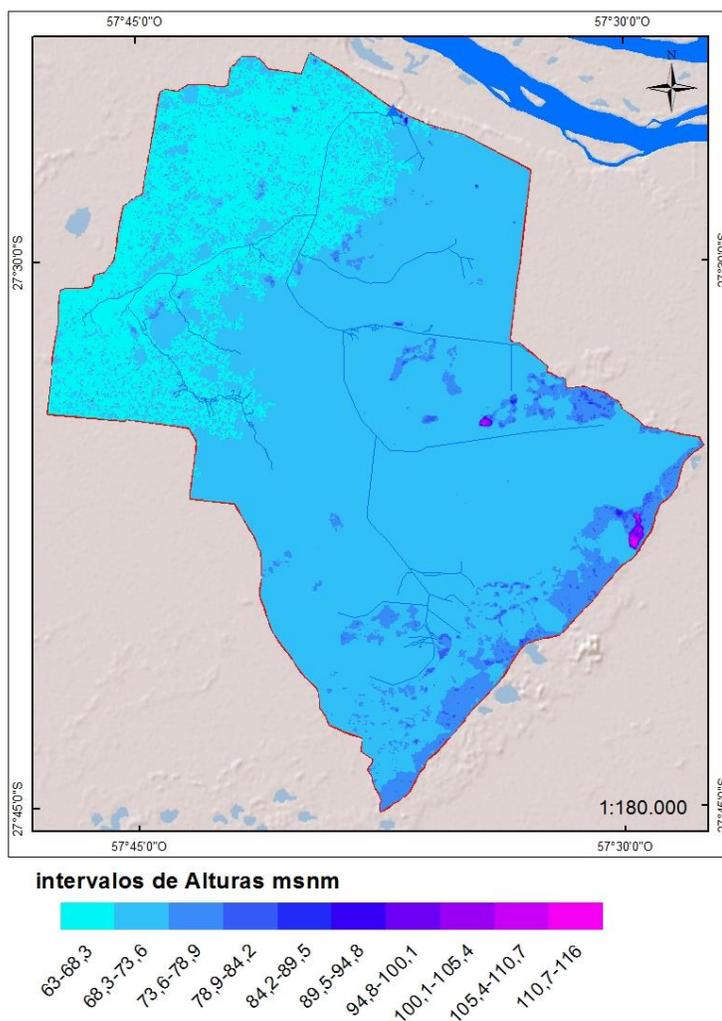
Mediante el Modelo de Elevación Digital (Figura 20), se obtuvo las alturas máximas y mínimas con respecto al nivel del mar, siendo 116 metros de altura máxima y 63 metros de altura mínima. También es notable como disminuye la altura en dirección sureste –noroeste.



**Figura 20:** Modelo de Elevación Digital SRTM 2013, de la Cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia

### 5.2.6.2.2 Curva hipsométrica (CH)

La curva hipsométrica de la cuenca del arroyo Santa María, se construyó en base al mapa altitudinal de la cuenca con intervalos de 5 metros, considerando como valores mínimos y máximos a 63 m.s.n.m y a 116 m.s.n.m respectivamente, obteniendo así 10 intervalos de alturas (Figura 21).



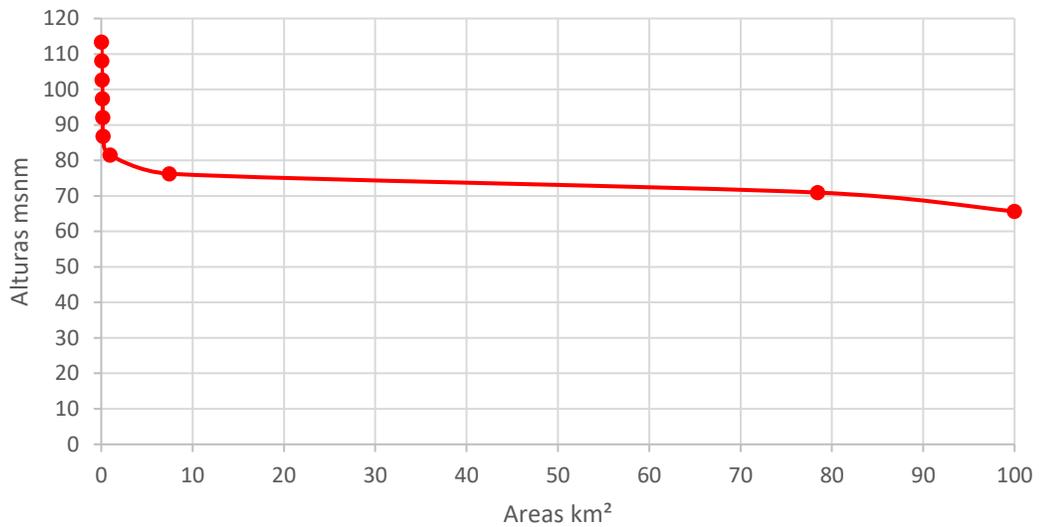
**Figura 21:** Intervalos de altura de la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

De los análisis de los polígonos obtenidos en el mapa anterior, se obtuvieron los siguientes valores.

**Tabla 14:** Valores altitudinales necesarios para la construcción de la Curva Hipsométrica

Intervalos	Cota (msnm)			Área (km <sup>2</sup> )				
	Mínimo	Máximo	Promedio de cotas (hi)	Área entre curvas (Ai)	Acumulado	% Acumulado	% Intervalo	hi*Ai
1	63	68,3	65,65	132,203	639,10	100	20,69	8679,13
2	68,3	73,6	70,95	460,825	506,90	79,31	72,11	32695,53
3	73,6	78,9	76,25	40,034	46,07	7,21	6,26	3052,59
4	78,9	84,2	81,55	4,642	6,04	0,94	0,73	378,56
5	84,2	89,5	86,85	0,314	1,40	0,22	0,05	27,27
6	89,5	94,8	92,15	0,154	1,08	0,17	0,02	14,19
7	94,8	100,1	97,45	0,287	0,93	0,15	0,04	27,97
8	100,1	105,4	102,75	0,256	0,64	0,10	0,04	26,30
9	105,4	110,7	108,05	0,219	0,39	0,06	0,03	23,67
10	110,7	116	113,35	0,089	0,17	0,03	0,01	10,09
				639,1			100,00	44935,30

Haciendo uso de los valores calculados con anterioridad se determinó la Curva Hipsométrica de la Cuenca del arroyo Santa María (Figura 22).

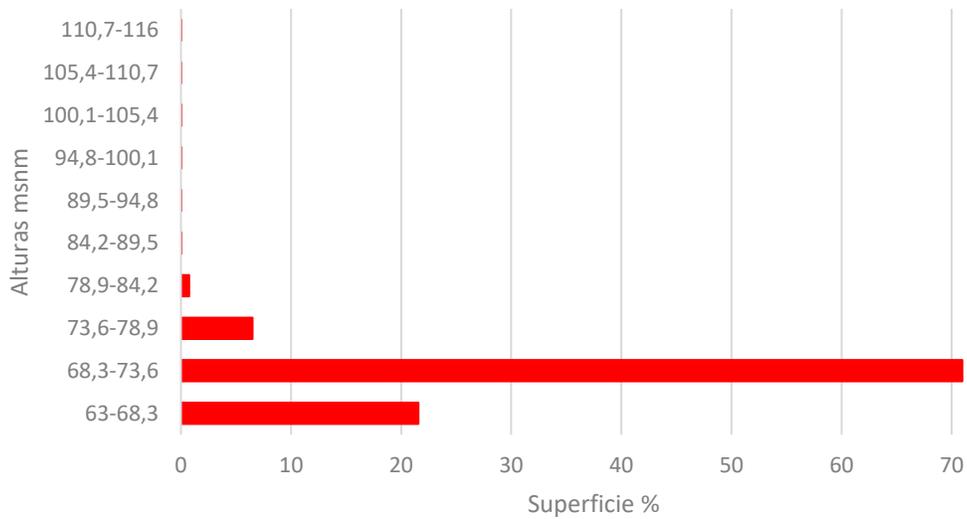


**Figura 22:** Curva Hipsométrica. Fuente: elaboración propia.

Como se puede notar en el gráfico de la curva hipsométrica, la cuenca del arroyo Santa María, es una cuenca sedimentaria, o sea que tiende a la vejez evolutiva (Llamas et. al. 1993).

#### 5.2.6.2.3 Altura media:

La altura media de la cuenca es de 70,2 m.s.n.m.



**Figura 23:** Histograma de Frecuencias Altimétricas. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 23 se puede apreciar que el intervalo con mayor frecuencia es el que comprende las alturas entre 68,3 y 73,6 msnm, por lo que la altura más frecuente sería 70,9 msnm.

#### 5.2.6.2.4 Pendiente Media:

La pendiente media de la cuenca del arroyo Santa María es de 1,36 %, que determina que el relieve de la cuenca sea suave.

#### 5.2.6.2.5 Coeficiente de Rugosidad:

El coeficiente de rugosidad es de 0,27 que significa que posee una rugosidad baja ya que son cuencas con relieve muy plano y una diferencia de alturas poco apreciable.

#### 5.2.6.2.6 Coeficiente Orográfico:

El coeficiente orográfico es de 7,92, por lo tanto, el potencial erosivo de la cuenca es bajo debido a su extensa área y su baja altura.

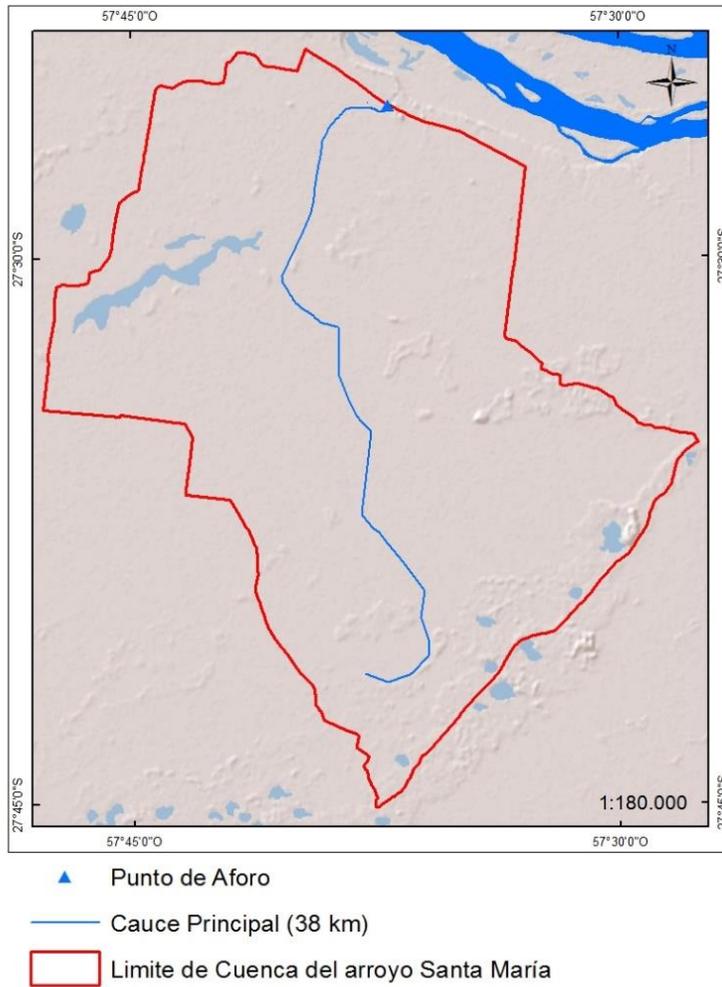
En la tabla 15 se muestran los valores calculados en base a la altura máxima y altura mínima presente en la cuenca del arroyo Santa María.

**Tabla 15:** Parámetros de relieve de la cuenca del arroyo Santa María

<b>Parámetros de Relieve</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Resultado</b>
Cota máxima	msnm	116
Cota mínima	msnm	63
Altura media	metros	70.2
Altura más Frecuente	metros	70,9
Pendiente media	%	1,36
Coeficiente de Rugosidad	adimensional	0,27
Coeficiente Orográfico	adimensional	7,92

#### 5.2.6.3 Parámetros de la Red Hidrográfica:

Para definir los parámetros de la red hidrográfica, fue necesario, aislar el cauce principal como se muestra en la Figura 24.



**Figura 24:** Cauce principal del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.6.3.1 Densidad de drenaje (Dd):

La Dd de la cuenca del arroyo Santa María es de 0,24 km (km<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.

#### 5.2.6.3.2 Pendiente Media del Cauce (J):

La J de la cuenca del arroyo Santa María es de 0,14 %.

#### 5.2.6.3.3 Tiempo de Concentración (Tc):

El Tc es de 6,92 horas, y una velocidad de partícula de 6,04 km h<sup>-1</sup>.

**Tabla 16:** Parámetros de la red Hidrográfica de la cuenca del arroyo Santa María

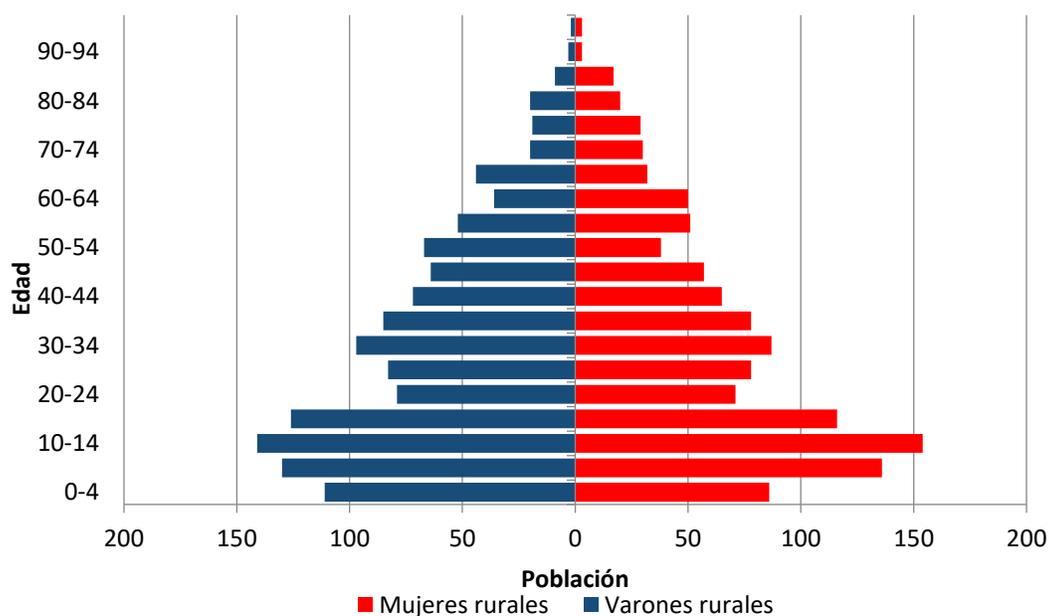
Parámetro de la Red Hidrográfica	unidad	Resultado
Longitud del cauce principal	km	38
Longitud de la red hídrica	km	156,38
Tiempo de concentración	Horas	6,92
Pendiente del cauce general	%	0,14
Densidad de drenaje	Km (km <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>	0,24

### 5.2.7 Sociocultural

Debido a que la cuenca no posee datos censales propios y esta abarca parte de los Municipios Berón de Astrada y Caá Catí se decidió utilizar datos censales de ambos municipios, dando así una idea del estado socio económico de la cuenca.

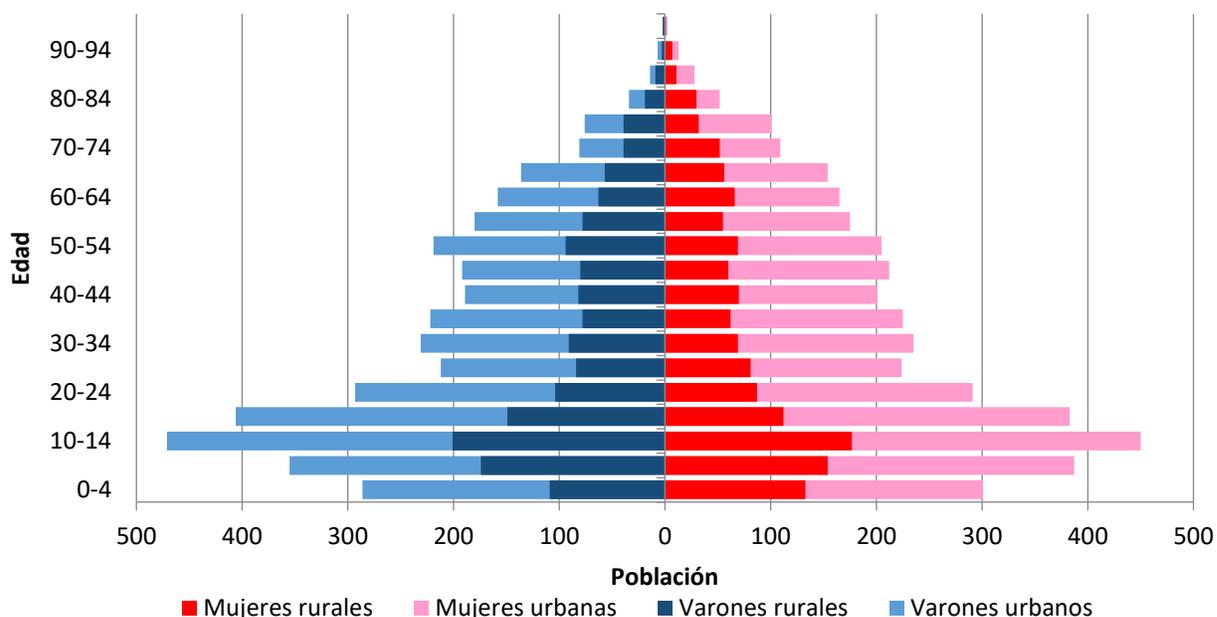
#### 5.2.7.1 Población y Demografía

La estructura poblacional del Municipio de Berón de Astrada, se compone de un total de 2461 habitantes entre mujeres, varones y niños, considerando el total de la población como rural (Figura 25).



**Figura 25:** Estructura poblacional quinquenal del Municipio Berón de Astrada. Fuente: DEyC de Corrientes 2010.

La estructura poblacional del Municipio de Caá Catí, cuenta con un total de 7677 pobladores, de los cuales 2935 son pobladores rurales (Figura 26), lo que significa un 38, 2 % de la población total.



**Figura 26:** Estructura poblacional quinquenal del municipio de Caá Catí. Fuente: DEyC de Corrientes 2010.

### 5.2.7.2 Educación

En la cuenca se registran 10 centros educativos, entre los que se destacan escuelas primarias y secundarias para niños y adultos, todas de origen estatal, ubicándose en el ámbito rural y urbano, existe también un colegio secundario, una escuela profesional y una escuela especial (Figura 27).

El 7,2 % de la población mayor a 10 años del Municipio Berón de Astrada no sabe, ni leer, ni escribir (Tabla 17), significando 144 pobladores del departamento.

**Tabla 17:** Analfabetismo del Municipio Berón de Astrada

Berón de Astrada	Sabe leer y escribir	No sabe leer, ni escribir	Total
Rural agrupado	1415	101	1516
Rural disperso	439	43	482
<b>Total</b>	<b>1854</b>	<b>144</b>	<b>1998</b>
<b>%</b>	<b>92,8</b>	<b>7,2</b>	

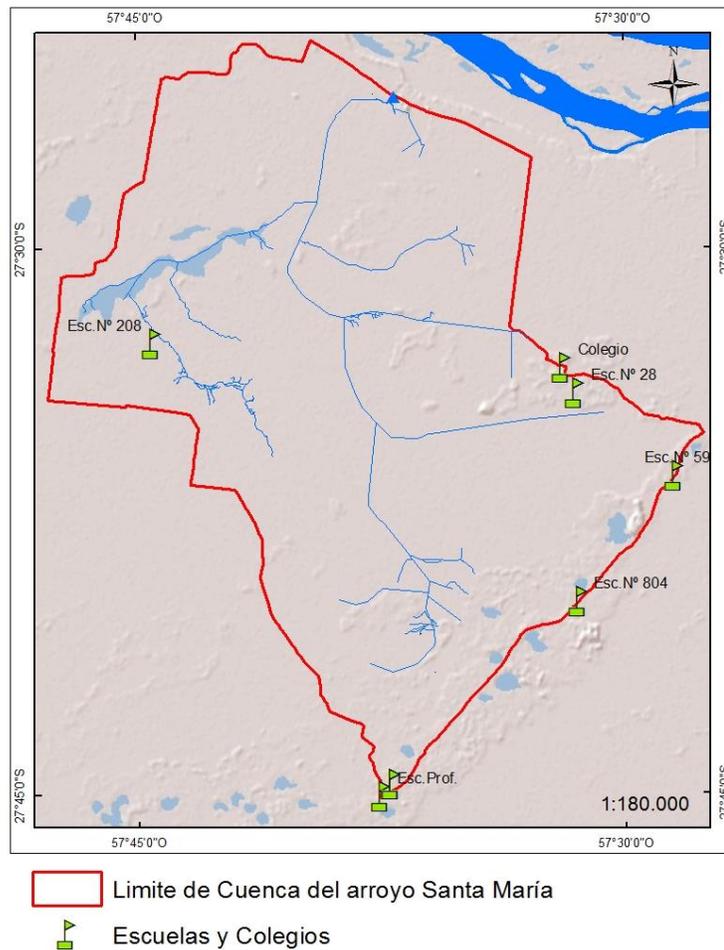
Fuente: DEyC de Corrientes 2010.

El 5,6 % de la población rural y urbana del Municipio de Caá Catí, no sabe leer, ni escribir (Tabla 18) lo que significa 356 pobladores del municipio.

**Tabla 18:** Analfabetismo del Municipio Caá Catí

Caá Catí	Sabe leer y escribir	No sabe leer, ni escribir	Total
Urbano	3830	149	3979
Rural disperso	2162	207	2369
<b>Total</b>	<b>5992</b>	<b>356</b>	<b>6348</b>
<b>%</b>	<b>94,4</b>	<b>5,6</b>	

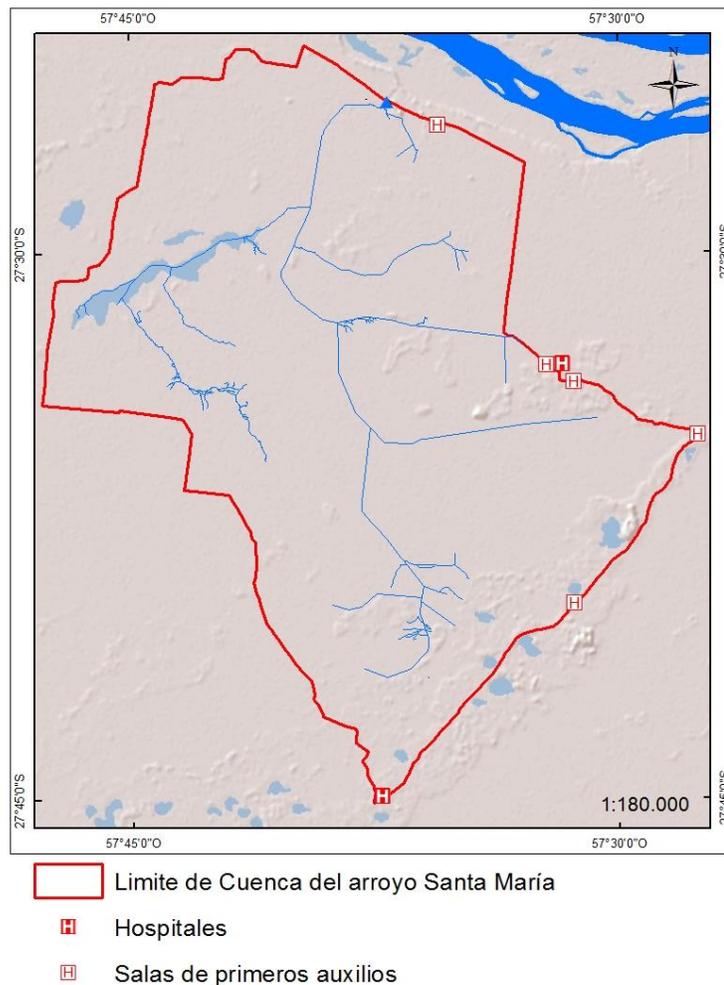
Fuente: DEyC de Corrientes 2010.



**Figura 27:** Ubicación de Escuelas Primarias y Secundarias en la cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

### 5.2.7.3 Salud:

En la cuenca existen dos Hospitales, el Hospital Juan Ramón Vidal ubicado en el municipio de Berón de Astrada y el Hospital San Vicente de Paul, ubicado en el municipio de Caá Catí. Ambos dependen del gobierno provincial, siendo de bajo riesgo con internación simple, donde existe falta de complejidad y especialidades como ser, ginecología, pediatría, kinesiología y otras. También existen centros de salud o salas de primeros auxilios, las cuales brindan servicios básicos. Quedando en evidencia la falta de asistencia médica en el lado oeste de la cuenca, lo que puede ser debido a la falta de accesibilidad, comuna dispersa, y falta profesionales de la salud. En la Figura 28 se visualiza la distribución de los centros de salud en la cuenca.



**Figura 28:** Ubicación de Hospitales y Centros de Salud en la cuenca del Arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia

### 5.3 Suelos

El 25,88 % de la superficie de la cuenca pertenece a cuerpos de aguas (Tabla 19), entre los que se encuentran los esteros, bañados, cañadas y cubetas de deflación (lagunas), ocupando unas 16.593,92 hectáreas.

En cuanto a los suelos, la serie Tataré (Albacualfes típicos) es la que predomina con un 25,21 % de la superficie, con 16.113,15 hectáreas; extendiéndose sobre un paisaje de planos hidromórficos con malezal (Escobar et al. 1986). Esta serie presenta una capacidad de uso (CU) de  $V_w$  y un Índice de productividad (IP) de 7, con problemas de excesos de aguas prolongados en la zona de crecimiento de las raíces.

La segunda serie en orden de ocupación es Torres (Argiudoles abruptos), con un 22,97 %, equivalente a 14.682,46 hectáreas (Tabla 19), las cuales también se desarrollan sobre planos hidromórficos con malezales, con una CU de  $VI_w$  y un IP de 5, relacionado con problemas de excesos de aguas prolongados.

La serie Chequin (Albacualfes típicos) continúa con 6.900,73 hectáreas, significando el 10,8 % de la superficie total de la cuenca. Tiene limitaciones muy severas que restringen la elección de plantas por su posición, que favorece el exceso de humedad y el drenaje deficiente. El uso actual es el de campo natural de pastoreo y el cultivo de arroz. La Clase de Capacidad de uso es  $V_w$  y el Índice de Productividad alcanza a 9.

La serie Timbó Paso (Natracuoles típicos), con 3,79 % de la superficie de la cuenca, significando 2.422,18 hectáreas, con una CU de  $VI_s$  y un IP de 7, y se desarrolla sobre antiguos albardones desmantelados por la erosión hídrica (Escobar et. al. 1986).

Las series Chavarría (Psamacuntes típicos), Berón de Astrada (Estrudeptes lamelicos) y la serie Loreto (Hapludalfes típicos), forman parte de las lomadas arenosas rojizas y pardo-amarillentas (Escobar et. al. 1986; Ligier et. al. 2014), ocupando el 8 % de la superficie de la cuenca, con 5.120,88 hectáreas (Tabla 19).

La serie Chavarría presenta una CU de  $IV_w$  y un IP de 15, es un suelo afectado por excesos de agua de origen freático (napas oscilantes) y baja fertilidad.

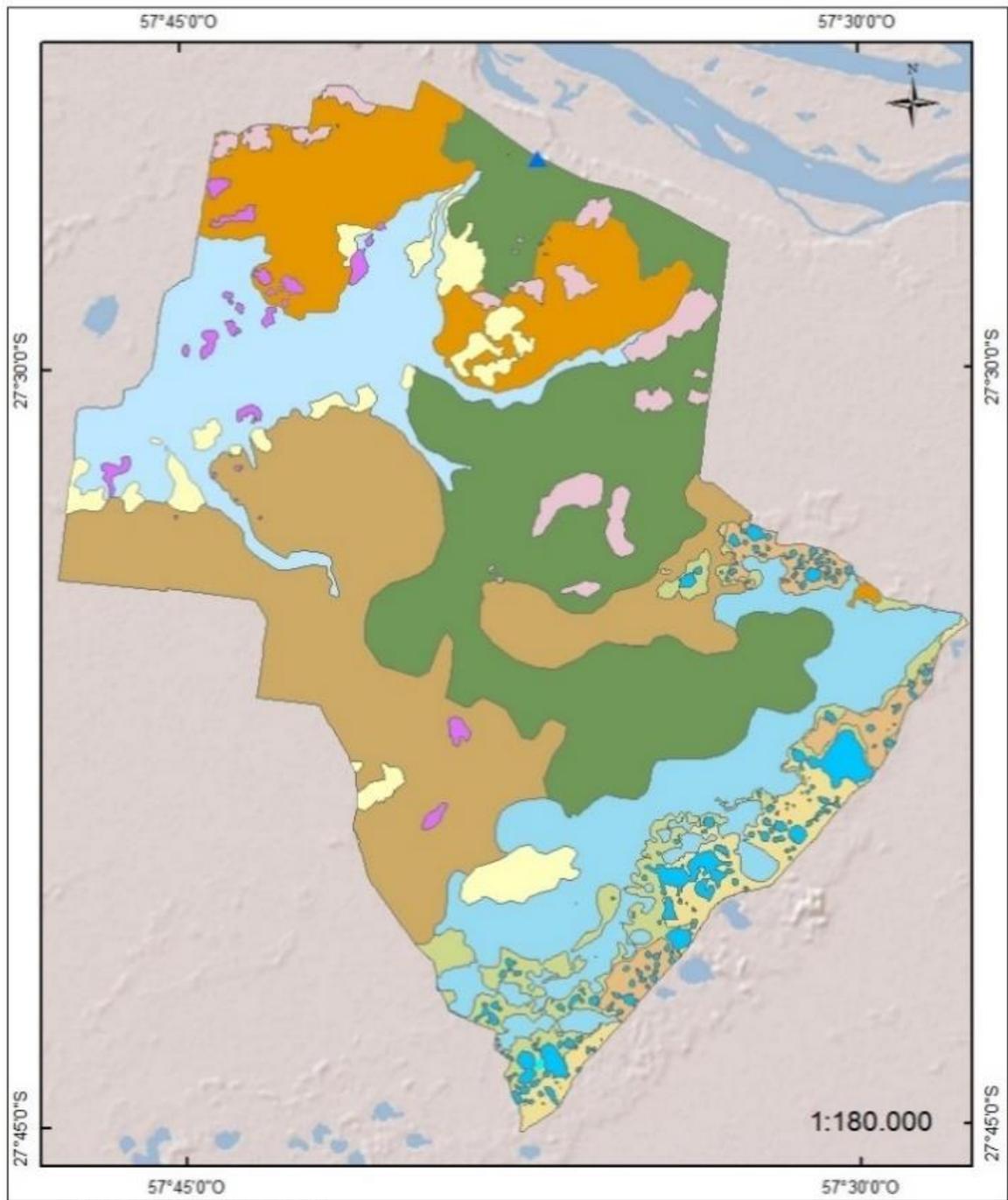
Las series Berón de Astrada y Loreto poseen una CU de  $III_e$  y un IP de 36 y 33 respectivamente, significando un suelo sin problemas frente a los excesos de agua, pero un alto riesgo de erosión hídrica y eólica, acompañada de baja fertilidad (Ligier et. al. 2014).

Las series restantes corresponden a Indalecio (Natracuoles típicos) y a Balboa (Haplacuales típicos), ocupando un 3,28 % de la superficie de la cuenca, lo que equivale a 2174,8 hectáreas (Tabla 19). Estos se desarrollan en isletas de bosques xerohalofilos e isletas de bosques mesohigrofiticos respectivamente, con una CU de VI<sub>s</sub> y un IP de 2 para la serie Indalecio, con limitaciones por excesos de sales en la zona de crecimiento de las raíces.

La CU de la serie Balboa es de V<sub>s</sub>, con un IP de 7, debido a su baja fertilidad y a la presencia de horizontes argílicos, los que reducen considerablemente la profundidad efectiva de este suelo (Escobar et. al. 1986). Las series de suelos mencionadas anteriormente se representan en la Figura 29.

**Tabla 19:** Series de suelos de la cuenca del arroyo Santa María

SERIES	Superficie (ha)	% de Ocupación en la cuenca
Estero Riachuelo	7.815,39	12,22
Balboa (Argiacuol típico)	550,06	0,86
Berón de Astrada (Estrudeptes lamelicos)	1.253,44	1,96
Chavarría (Psamacuntes típicos)	2.351,91	3,68
Chequín (Endoacualfes típicos)	6.900,73	10,80
Cubetas de Deflación	1.387,52	2,17
Esteros, bañados y Cañadas	7.294,08	11,41
Indalecio (Natracuoles típicos)	1.624,42	2,42
Loreto (Hapludalfes típicos)	1.515,53	2,37
Tataré (Albacualfes típicos)	16.113,15	25,21
Timbó Paso (Natracuoles típicos)	2.422,18	3,79
Torres (Argiacuol abruptico)	14.682,46	22,97
TOTAL	63.910	100,00



**SUELOS 1:50000 cm**

	A° RIACHUELO		CHEQUIN		LORETO
	BALBOA		CUBETAS DE DEFLACIÓN		TATARE
	BERÓN DE ASTRADA		CUERPOS DE AGUAS		TIMBO PASO
	CHAVARRIA		INDALECIO		TORRES

**Figura 29:** Suelos de la cuenca del arroyo Santa María, escala 1:50000. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4 Uso del suelo de la cuenca del arroyo Santa María

A partir de la identificación de la cobertura del suelo de la cuenca, se registraron 14 tipos de usos diferentes (Figura 30), los cuales fueron validados a campo, mediante el empleo de navegación satelital a tiempo real.

En función de los datos relevados se confeccionaron 9 clases de usos del suelo diferentes (Tabla 20) y según la siguiente descripción de cada categoría:

**Agricultura Extensiva-Labranza Convencional:** Conformado por cultivos anuales de grano grueso, como el sorgo y el maíz. También se incluyen lotes en descanso o en barbecho agrícola. La labranza utilizada es la convencional con rastras de discos. Esta clase ocupa el 0,09 % de la superficie de la cuenca (Tabla 20), significando 57 hectáreas del total.

**Agricultura Extensiva-Labranza Reducida:** en esta clase encontramos al cultivo de arroz como principal y único cultivo realizado con labranza reducida o siembra directa, además de ser sembrado en forma directa, se lo realiza con pendiente 0°, o sea que no existe pendiente alguna en el lote, lo que se traduce en ahorro en la utilización de taipas, controlando así la lámina de riego y el secado del lote al inicio de cosecha. Cabe destacar que la nivelación consta de movimientos de suelos, rellenando o extrayendo sitios donde falta o sobra suelo respectivamente. Esta categoría ocupa unas 12.041,07 hectáreas en la cuenca, lo que representa un 18,84% de la superficie total de la cuenca (Tabla 20).

**Agricultura Intensiva:** esta categoría es compuesta por cultivos hortícolas a campo (mandioca, zapallo, sandía, melones, batatas, porotos) y bajo cubierta plástica (invernáculos), la mayor producción se da con los cultivos de hojas, para consumo en fresco. También se identificó una creciente producción de tomates y pimientos dentro de invernáculos. Todas las labranzas en esta categoría se realizan en forma mecánica, con tracción mecánica o a sangre. Esta clase ocupa un 0,17 % del total de la superficie de la cuenca (Tabla 20), representando 106,2 hectáreas.

**Bosques implantados:** incluye áreas con especies forestales, eucaliptos principalmente; de variadas edades y ciclos de plantación. Se encuentran formando macizos, cortinas rompe vientos y bosques de reparo animal en algunos casos. La implantación se realiza sobre camellones o

lomos, utilizando plantines de variedades o clones de viveros locales. El control de malezas se realiza en forma mecánica o química. Esta categoría ocupa unas 838,5 hectáreas en la cuenca, significando un 1,31 % de la superficie total de la cuenca (Tabla 20).

**Bosques Nativos:** formada por bosques mesohidrofiíticos y xerohalófilos, entendiéndose como mesohidrofiíticos a los bosques de especies que poseen una tolerancia media a la falta de oxígeno, generalmente se encuentran en islotes sobre elevados y orillares de cuerpos de aguas (Gallego et. al. 2011) y por bosques xerohalófilos a bosques con especies xerófilas asociadas a otras halófitas (*Schinopsis balansae*, *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Prosopis affinis*, *Prosopis* sp., además de *Bromelia* y *aechmea* sp.). Esta categoría representa un total de 2.217,15 hectáreas en la cuenca (Tabla 20), siendo un 3,47% de la superficie total.

**Pasturas Megatérmicas:** esta categoría es formada mayoritariamente por pasturas del género *Brachiaria*, con una alta variedad de especies y cultivares. Representando 546,7 hectáreas de la cuenca, lo que equivale a 0,8 %de la superficie total de la cuenca (Tabla 20).

**Cuerpos de Aguas:** esta categoría está formada por lagunas, esteros, bañados y cañadas, juntas ocupan unas 4.856,7 hectáreas de la cuenca (Tabla 20), siendo un 7,60 % de la superficie total.

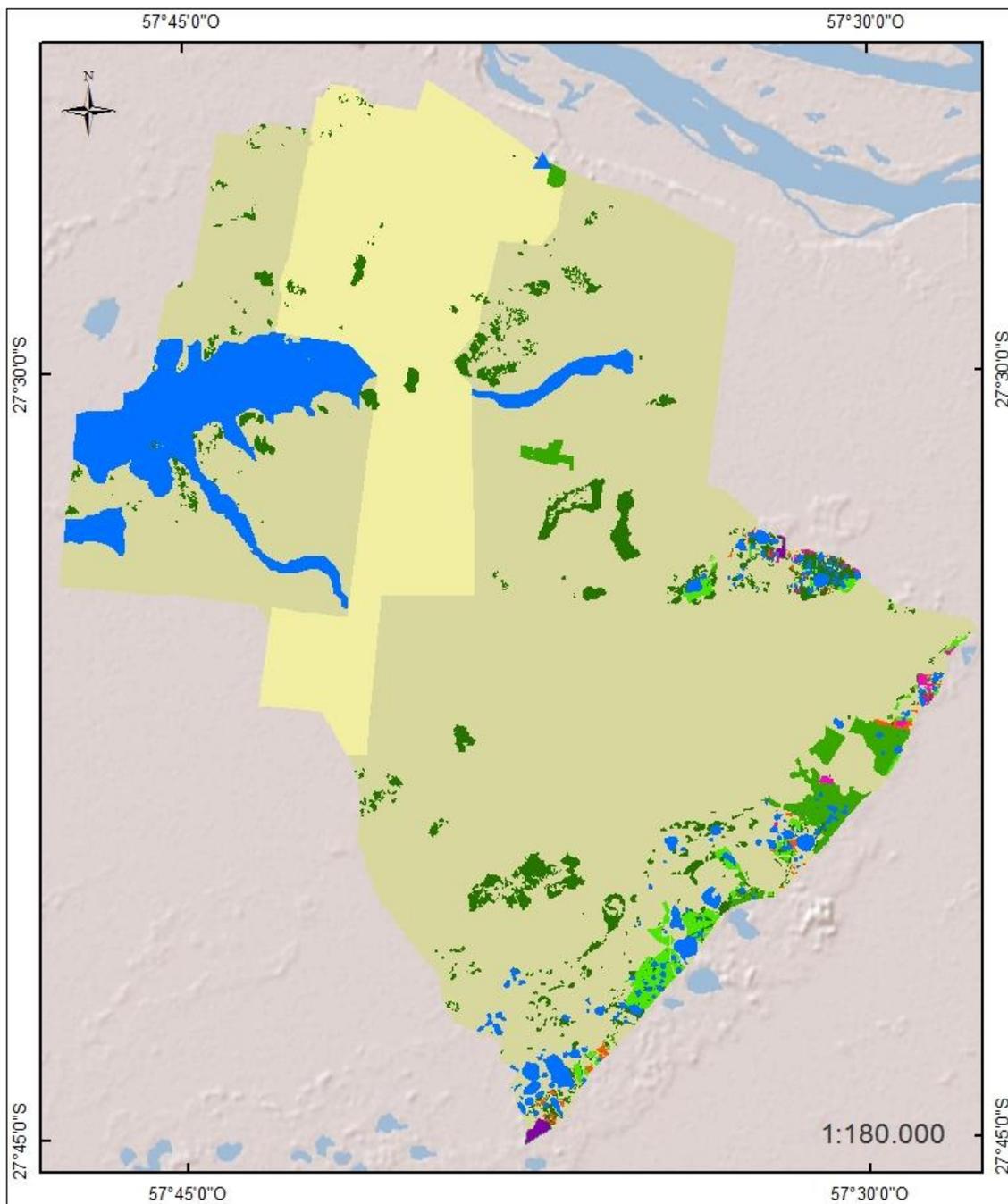
**Ganadería de cría extensiva:** esta clase la conforman los ambientes de pastizales naturales, planos y valles de inundación de la cuenca. La ganadería se desarrolla de forma extensiva a campo abierto, con cargas ganaderas variables según la estación del año. Esta clase ocupa la mayor superficie de la cuenca, significando un 67,57% de la superficie total de la cuenca, lo que equivale a 43.183 hectáreas (Tabla 20).

**Centros Urbanos:** esta clase la componen los municipios de Caá Catí y Berón de Astrada, estos ocupan un 0,007 y un 0,002 % de la superficie total de la cuenca (Tabla 20).

**Tabla 20: Usos de suelos identificados en la Cuenca del Arroyo Santa María**

Clase de Uso y Manejo del suelo	Superficie en (ha)	Superficie (%)	Tipo de Uso	Superficie en (ha)	Superficie (%)
Agricultura Extensiva	12.098	18,93	Labranza Convencional	57	0,09
			Labranza Reducida	12.041	18,8
			Agricultura Intensiva	106,2	0,17
Agricultura Intensiva	106,2	0,17	Horticultura bajo cubierta plástica	3,91	0,006
			Horticultura a campo	102,29	0,160
Bosques implantados	838,5	1,31	Eucaliptus grandis	838,5	1,31
Bosques Nativos	2.217,15	3,47	Bosques mesohidrofíticos y xerohalófilos	2.217,15	3,47
			Pasturas Megatérmicas	546,7	0,86
Cuerpos de Aguas	4.856,70	7,6	Brachiaria	546,7	0,86
			Lagunas	919,4	1,44
			Esteros	3696,5	5,78
Cuerpos de Aguas	4.856,70	7,6	Bañados y cañadas	240,8	0,38
			Ganadería	43.183	67,57
Centros Urbanos	59,55	0,09	Cría extensiva (bovina y bubalina)	43.183	67,57
			Municipio de Caá	42,68	0,07
			Catí	16,87	0,026
TOTALES	63910	100		63910	100

Fuente: elaboración propia.



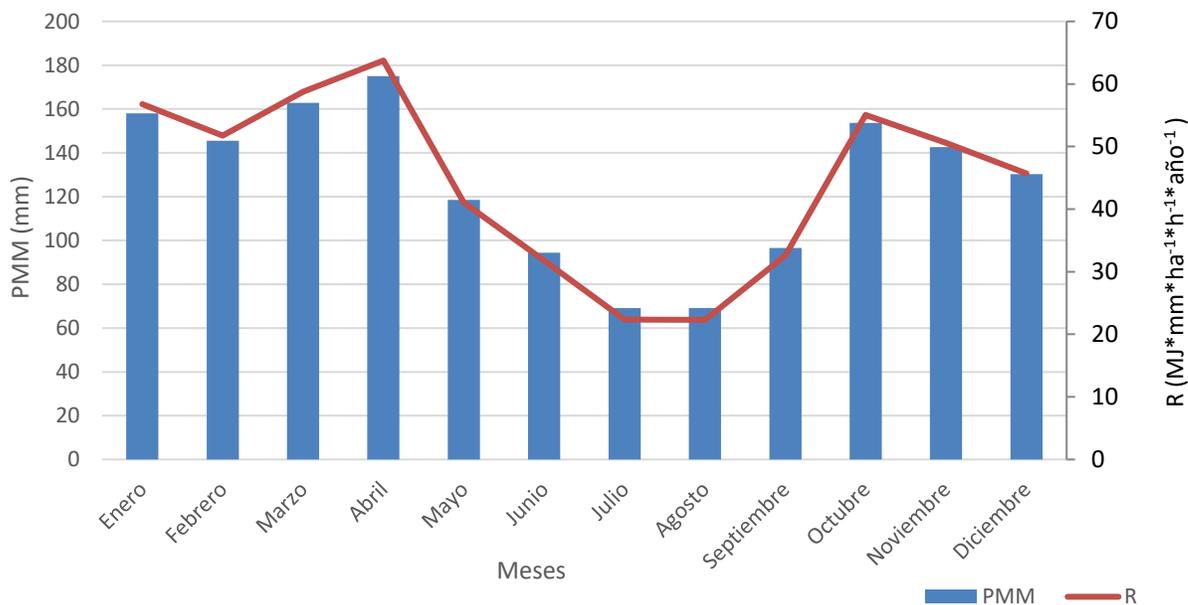
- |  |  |
|--|--|
| <span style="color: magenta;">■</span> Agricultura Extensiva-Labranza Convencional | <span style="color: olive;">■</span> Ganaderia Extensiva       |
| <span style="color: yellow;">■</span> Agricultura Extensiva-Labranza Reducida      | <span style="color: darkgreen;">■</span> Bosques Nativos       |
| <span style="color: orange;">■</span> Agricultura Intensiva                        | <span style="color: limegreen;">■</span> Pasturas Megatermicas |
| <span style="color: green;">■</span> Bosques Implantados                           | <span style="color: purple;">■</span> Centros Urbanos          |
| <span style="color: blue;">■</span> Cuerpos de Aguas                               |  |

**Figura 30:** Uso del Suelo en la Cuenca del Arroyo Santa María, año 2013. Fuente: elaboración propia.

## 5.5 Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)

### 5.5.1 Factor (R) erosividad de las lluvias

Para la cuenca del arroyo Santa María se ha calculado anualmente y mensualmente el factor R para el periodo 1970-1995 y se representa en la Figura 31 en forma conjunta con la precipitación media mensual (PMM).



**Figura 31:** Erosividad media anual de la lluvia en la cuenca del arroyo Santa María en los años 1960-1995. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la Figura 31, se aprecia la relación que existe entre las precipitaciones medias mensuales y los índices de erosividad mensual en la cuenca.

La erosividad total calculada es  $882,86 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , siendo la precipitación media anual de 1515,83 mm.

El factor R resultante, guarda concordancia con el mapa de isoerodentas (líneas de igual erosividad) indicado por Gaitan et. al. (2017). En este factor se tiene la seguridad que los datos de lluvia utilizados corresponden a una estación meteorológica localizada dentro de la cuenca, condición importante para lograr resultados coherentes con la realidad (Wanielista et. al. 1997). Sin embargo, no deja de ser una estimación del factor, por lo que es recomendable obtenerlo

mediante el empleo de pluviogramas (Wischmeier y Smith, 1978) o algún factor dependiente de la intensidad de lluvia, como datos horarios de lluvia (Colotti, 1998), y el uso de una red pluviométrica para incluir el efecto topográfico (Wanielista et. al. 1997), que mejoraría la distribución en tiempo y espacio del factor.

## 5.5.2 Factor (K) erodabilidad del suelo

### 5.5.2.1 Subfactores del factor (K) del modelo EUPS:

El Factor K derivado de la ecuación universal (EUPS) para la predicción de la pérdida de suelo, conceptualmente brinda información sobre la susceptibilidad del suelo frente a la erosividad de la lluvia, y considera una erosividad particular bajo condiciones estándar de parcelas. Esto surge experimentalmente y no basado en simulaciones del proceso de erosión. Por este camino de estimación de K se considera que la erosión puede deberse a la erodabilidad del suelo (susceptibilidad) pero también puede variar frente a otras variables, como la intensidad de lluvia y manejo (Piscitelli et. al.2010). Es por ello que se realizó el cálculo de los subfactores de la ecuación propuesta por Wischmeier et. al.1971.

#### 5.5.2.1.1 Materia Orgánica:

En la Figura 32.a existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados en la serie Berón de Astrada, notándose que los usos Mandioca (MO=0,96 %) y Pastura (MO=0,98 %), no se diferencian entre ellos, pero si lo hacen del resto. A su vez el uso Bosque Nativo (MO=0,63 %) se diferencia del uso Forestación (MO= 0,2 %).

En la serie Chavarría (Figura 32.b), existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), entre el Bosque Nativo (MO=1,27 %) y los usos Pastura (MO=0,36 %) y Ganadería Extensiva (MO= 0,64%).

En la Figura 32.c, serie Chequín, existen diferencias significativas entre el uso Arroz (MO=1,14 %) y el uso Ganadería Extensiva (MO= 1,43 %).

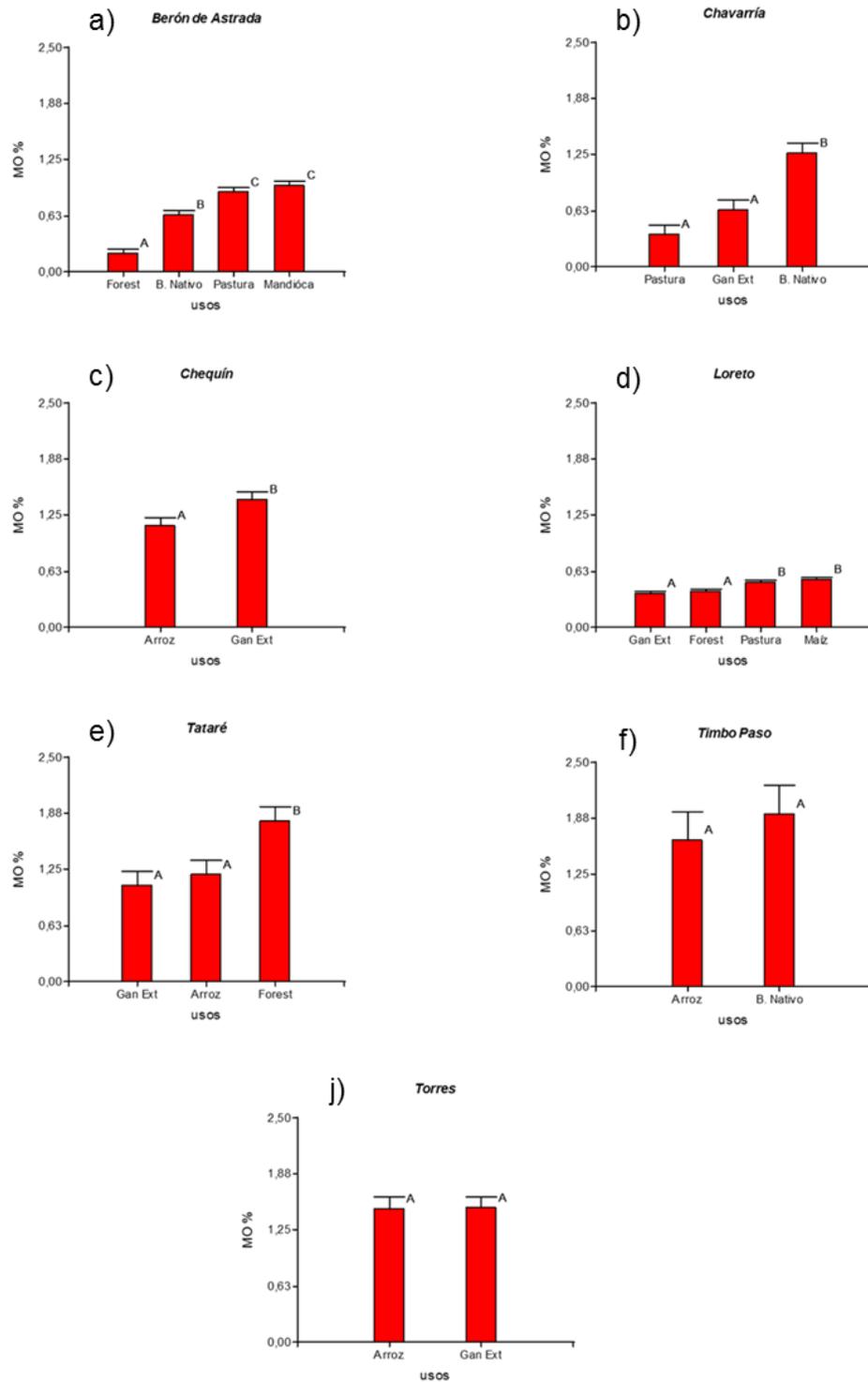
En la serie Loreto (Figura 32.d), no se aprecian diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre los usos Pastura (MO= 0,5 %) y Maíz (MO=0,53%), pero si se diferencian de los usos Ganadería Extensiva (MO= 0,38 %) y Forestación (MO= 0,4 %), los cuales no se diferencian estadísticamente ( $P < 0,05$ ).

En el caso de la serie Tataré (Figura 32.e), existen diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre el uso Forestación (MO= 1,79 %) y los usos Ganadería Extensiva (MO= 1,07 %) y uso Arroz (MO= 1,19 %).

En la Figura 32.f no existen diferencias estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) entre los usos Arroz (MO= 1,64 %) y Bosque Nativo (MO= 1,93 %) evaluados en la serie Timbo Paso.

En la serie Torres (Figura 32.j) no se aprecian diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos Arroz (MO= 1,49 %) y el uso Ganadería Extensiva (MO= 1,5 %).

Los resultados y resumen de medidas estadísticas se visualizan en Anexos (Anexo 1- Tabla 1- Medidas de resumen del Contenido de materia orgánica encontrado en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María).



**Figura 32:** Contenido de Materia Orgánica en sitios evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucalyptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*).

#### 5.5.2.1.2 Textura:

Una vez que se determinaron los tamaños de partículas presentes en cada serie y uso de suelo evaluado (Anexo 2-Tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Medidas de resumen de la textura de suelo para las series Berón de Astrada, Chavarría, Chequín, Loreto, Tataré, Timbo Paso y Torres), se estableció el tipo de textura, destacándose el valor del contenido de arcilla, limo y arena muy fina, datos útiles en el cálculo de erodabilidad.

Así la serie Berón de Astrada con uso Bosque Nativo presenta una textura arenosa franca (Tabla 25), contenido de arcilla del 11,22 %, contenido de arena muy fina igual a 2,46 % y contenido de limo de 7,1 %. Mientras que el uso Forestación (arcilla=6,78 %, arena muy fina=2 % y limo= 3,3 %) presentó una textura arenosa (Tabla 25).

En el caso del uso Mandioca (arcilla=9,9 %, arena muy fina= 3,38 % y limo= 5,88 %), se lo clasifico con textura arenosa franca. El uso Pasturas (arcilla= 9,66%, limo=4,69 % y arena muy fina= 2,91 %), clasificándose con una textura arenosa franca (Tabla 25).

En el caso de la serie Chavarría el uso Bosque Nativo (arcilla=10,74 %, Limo= 5,44 % y arena muy fina= 2,67 %), se lo clasifico con una textura arenosa franca (Tabla 25). De esta misma manera se clasificó a los usos Ganadería Extensiva (arcilla= 9,36 %, limo= 5,72 % y arena muy fina= 2,62 %) y al uso Pasturas (arcilla= 9,02 %, limo= 3,62 % y arena muy fina= 2,59 %), como textura arenosa franca (Tabla 25).

En la serie Chequín ambos usos evaluados (Arroz (arcilla= 13,28 %, limo= 17,54 % y arena muy fina= 1,39 %) y Ganadería Extensiva (arcilla= 13,32 %, limo= 16 % y arena muy fina= 0,95 %)), presentaron una textura franco arenosa (Tabla 25).

Para la serie Loreto se determinó que la totalidad de los usos evaluados presentó textura arenosa franca (Tabla 25), determinándose valores de arcilla=11,78 %, limo= 6,48 % y arena muy fina= 2,62 % para el uso Forestación. Para el caso del uso Ganadería Extensiva se encontraron valores de arcilla= 9,58 %, limo= 3,94 % y arena muy fina= 2,32 %. El uso Maíz (arcilla= 10,84 %, limo= 5,82 % y arena muy fina= 2,83 %) presentó valores similares al uso Pasturas (arcilla= 12,24 %, limo= 5,62 % y arena muy fina 2,39 %).

La serie Tataré presentó en todos los usos evaluados una textura franco arenosa (Tabla 25), determinándose que el uso Arroz contenía arcilla= 12,82%, limo= 19,81% y arena muy fina 1,3 %, mientras que el uso Forestación contaba con arcilla= 15,04 %, limo= 18,34 % y arena muy

fina= 2,32 %. El uso Ganadería Extensiva presentó arcilla= 12,76 %, limo= 15,5 % y arena muy fina= 1,76 %.

En la serie Timbo Paso tanto el uso Arroz (arcilla= 16,08 %, limo 20,74 % y arena muy fina= 1,9 %), como el uso Bosque Nativo (arcilla= 11,24 %, limo= 19,44 % y arena muy fina= 1,48 %), presentaron textura franco arenosa (Tabla 25).

La serie Torres presentó una textura franco arenosa en ambos usos evaluados, así el uso Arroz contenía arcilla= 11,62 %, limo= 18,6 % y arena muy fina= 1,32, mientras que el uso Ganadería Extensiva presentó, arcilla= 13,64 %, limo= 18,34 % y arena muy fina= 1,9 %.

**Tabla 21:** Tipos de texturas clasificados para series y usos de suelos evaluados en la cuenca.

Series	Usos	Textura
Berón de Astrada	Bosque Nativo	Arenoso Franco
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	Arenoso
	Mandioca	Arenoso Franco
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	Arenoso Franco
Chavarría	Bosque Nativo	Arenoso Franco
	Ganadería Extensiva	Arenoso Franco
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	Arenoso Franco
Chequín	Arroz	Franco Arenoso
	Ganadería Extensiva	Franco Arenoso
Loreto	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	Arenoso Franco
	Ganadería Extensiva	Arenoso Franco
	Maíz	Arenoso Franco
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	Arenoso Franco
Tataré	Arroz	Franco Arenoso
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	Franco Arenoso
	Ganadería Extensiva	Franco Arenoso
Timbo Paso	Arroz	Franco Arenoso
	Bosque Nativo	Franco Arenoso
Torres	Arroz	Franco Arenoso
	Ganadería Extensiva	Franco Arenoso

Fuente: elaboración propia

#### 5.5.2.1.3 Estructura:

Los resultados obtenidos en base a la clasificación numérica basada en USDA, 2000 se visualizan en Anexos IV-Tabla 9 (Tipo y grado de Estructura de suelo, en sitios seleccionados por su uso y serie de suelo).

De esta manera se determinó que para la serie Berón de Astrada, Chavarría y serie Loreto, la estructura encontrada en todos los usos evaluados corresponde a estructura regular, siendo esta granular media a granular gruesa, con agregados de 2 a 10 mm de diámetro y presencia de bloques subangulares y bloques angulares irregulares finos y medios, sumándose estructura de grano suelto. Mientras que para las series Chequín, Tataré, Timbo paso y Torres, se las clasifico como estructura mala según (USDA, 2000), debido a que presentaba agregados de diversos tamaños, con presencia de bloques angulares regulares e irregulares medios y hasta en algunos casos gruesos.

#### 5.5.2.1.4 Infiltración:

En la Figura 33.a se visualizan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre todos los usos evaluados sobre la serie Berón de Astrada. Registrándose infiltración rápida para los usos Mandioca ( $287,97 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y Forestación ( $317,27 \text{ mm.h}^{-1}$ ). Mientras que el uso Pastura ( $87,4 \text{ mm.h}^{-1}$ ) presentó infiltración moderadamente rápida y el uso Bosque Nativo ( $54,77 \text{ mm.h}^{-1}$ ) registro infiltración moderada.

En la serie Chavarría (figura 33.b) se observaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre el uso Ganadería Extensiva ( $108,33 \text{ mm.h}^{-1}$ = infiltración moderadamente rápida) y los usos Bosque Nativo ( $131,93 \text{ mm.h}^{-1}$ = infiltración rápida) y el uso Pasturas ( $141,87 \text{ mm.h}^{-1}$ = infiltración rápida).

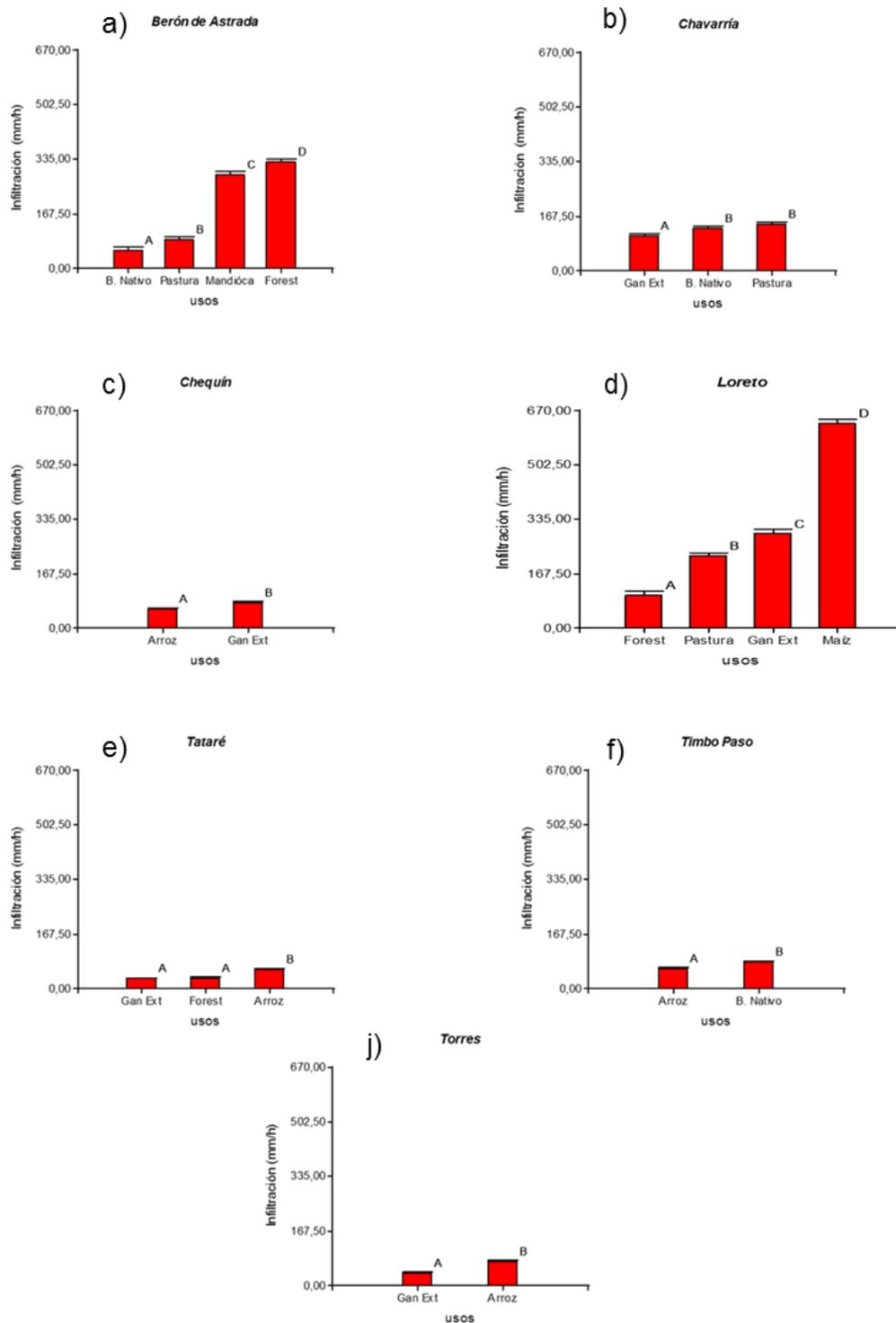
La serie Chequín (figura 33.c) presentó infiltración moderadamente rápida en ambos casos evaluados, a pesar de existir diferencias estadísticas significativas entre ellos, registrándose valores de  $58,8 \text{ mm.h}^{-1}$  para el caso del Arroz y  $79,2 \text{ mm.h}^{-1}$  para el uso Ganadería Extensiva.

En el caso de la serie Loreto (Figura 33.d), se registran diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), entre todos los usos evaluados en la serie. Encontrándose que el uso Forestación es el único que posee infiltración moderadamente rápida ( $103,03 \text{ mm.h}^{-1}$ ), mientras que los usos Pasturas ( $222,09 \text{ mm.h}^{-1}$ ), Ganadería Extensiva ( $292,63 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y Maíz ( $637 \text{ mm.h}^{-1}$ ) presentan infiltración rápida.

En la Figura 33.e se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre el uso Arroz ( $60,7 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y los usos Forestación ( $33,13 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y Ganadería Extensiva ( $31,7 \text{ mm.h}^{-1}$ ). De igual manera los tres usos evaluados se clasificaron con infiltración moderada.

En la serie Timbo Paso (Figura 33.f) se registraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre el uso Arroz ( $61,23 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y el uso Bosque Nativo ( $83,2 \text{ mm.h}^{-1}$ ), a pesar de encontrarse diferencias estadísticas ente ambos casos los dos fueron clasificados como infiltración moderadamente rápida.

En la (Figura 33.j), se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados para la serie Torres. Determinándose que el uso Arroz ( $74,3 \text{ mm.h}^{-1}$ ) presentó infiltración moderadamente rápida, mientras que el uso Ganadería Extensiva ( $40,87 \text{ mm.h}^{-1}$ ) se clasifico como infiltración moderada.



**Figura 33:** Determinación de la infiltración ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) en sitios evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucaliptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*)).

Los valores de los resultados estadísticos obtenidos para la variable infiltración pueden encontrarse en la sección anexos (Anexos III- Tabla 9: Medidas de resumen de valores de infiltración calculados para sitios evaluados). Mientras que los resultados de la clasificación según USDA de los sitios evaluados pueden verse en (Anexos III- Tabla 10: Clasificación de la infiltración de las series y usos de suelos en la cuenca del arroyo Santa María según USDA).

### 5.5.2.2 Cálculo del factor K

El factor (K) erodabilidad del suelo Wischmeier y Smith (1978) representa tanto a la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica como a la tasa de escurrimiento, así los suelos ricos en arcilla tienen valores adimensionales de K cerca de 0,05 a 0,15, porque ellos son resistentes al desprendimiento (Eyenari et al. 1971). Los suelos con textura gruesa, como los arenosos, tienen valores adimensionales de K cerca de 0,05 a 0,2, por causa del bajo escurrimiento superficial, a pesar de que éstos suelos se desprenden fácilmente. La pérdida de sedimentos está directamente relacionada con el incremento de las fracciones texturales de limo y arena muy fina e inversamente relacionada con el contenido de materia orgánica del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

Debido a la diferencia textural existente entre los sitios evaluados, se analizó la relación de regresión ( $R^2$ ), agrupando los sitios por separado según su textura. De esta manera se agrupó a los sitios con texturas Arenosa franca por un lado y a los sitios con textura Franco arenosa por otro.

Se realizaron análisis de regresiones  $R^2$  entre el valor de K obtenidos por la ecuación propuesta por Wischmeier et. al.1971 y distintas variables del suelo obtenidas en cada sitio evaluado clasificado con textura Arenosa franca (Tabla 25). En la Tabla 26 se presentan los coeficientes de correlación  $R^2$  obtenidos entre el factor K y las distintas variables. De las Asociaciones evaluadas la que presenta mejor ajuste es el porcentaje de Limo ( $R^2=0,53$ ), seguida de la Infiltración ( $R^2=0,20$ ). La Materia Orgánica ( $R^2=0,02$ ), para la población de datos presentes tiene la correlación más baja con K. También se destacan los bajos coeficientes para arcilla ( $R^2=0,05$ ) y arenas muy finas ( $R^2=0,04$ ).

**Tabla 22:** Coeficiente de análisis de regresión entre el factor K y distintas variables de suelos con textura Arenosa franca obtenidas para los diferentes sitios evaluados.

	A M F	Arcilla	Limo	Inf	MO
$R^2$	0,04	0,05	0,53	0,20	0,02

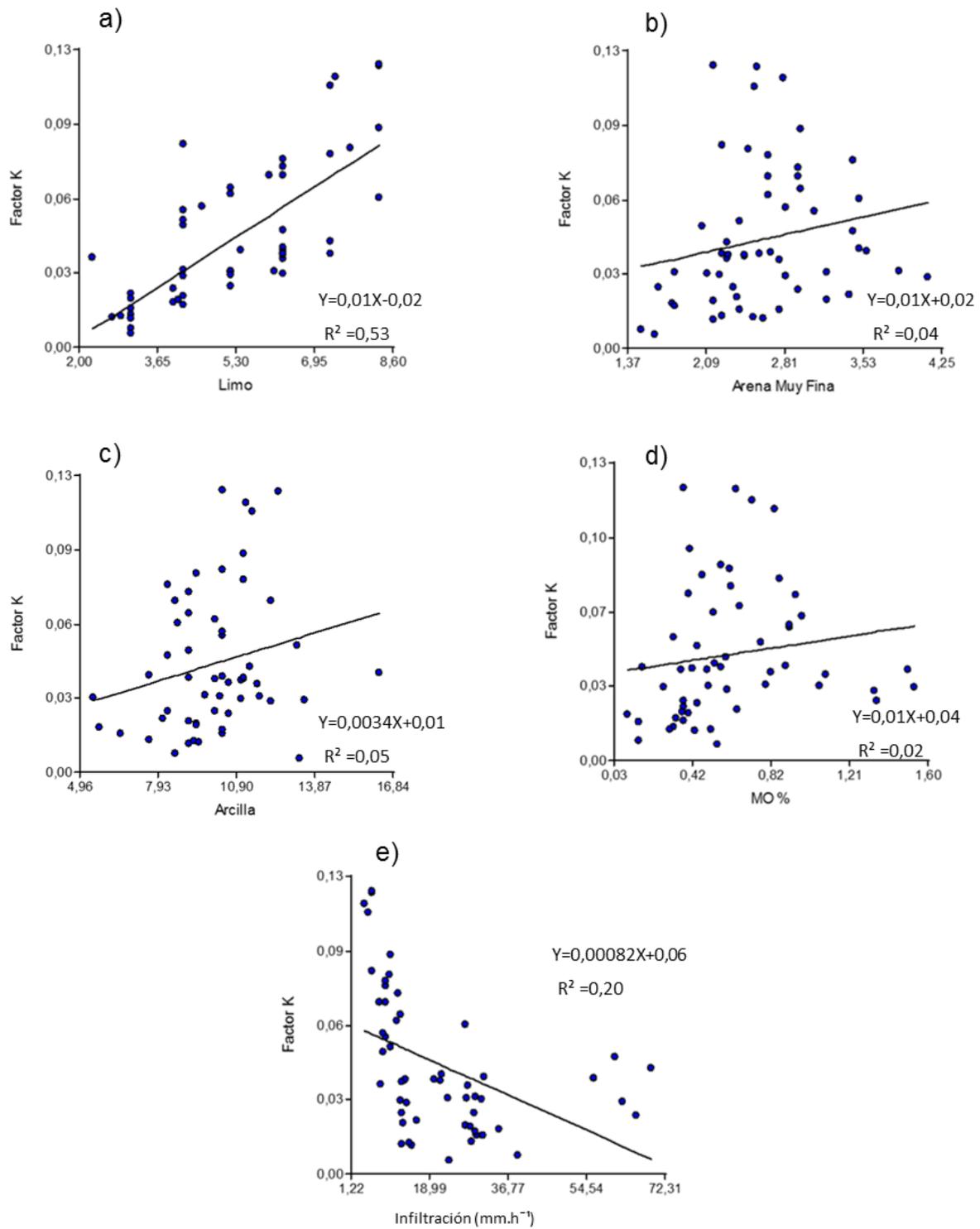
AMF: Arena Muy Fina, Inf: Infiltración, MO: Materia Orgánica

En la Figura 34.a se observa que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de contenido de Limo y la erodabilidad (K). El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2= 0,53$ , es decir el 53% de la suma de los cuadrados totales (K) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.

En la Figura 34.b, 34.c y 34.d se observa una relación positiva entre el contenido de Arena Muy Fina, el contenido de Arcilla y el contenido de Materia Orgánica con el factor K, observándose un

bajo ajuste entre estas variables con la variable regresora (Factor k), que no concuerda con los principios teóricos propuestos por (Wischmeier et. al.1971).

En la Figura 34.e se observa relación negativa entre la Infiltración y el Factor K, a medida que se incrementan valores de Infiltración, disminuyen los valores de K. Cabe aclarar que solo el 20 % de los datos puede ser explicado mediante esta asociación.



**Figura 34:** Coeficiente de Análisis de regresión entre variables evaluadas y el Factor K en sitios con textura Arenosa franca. Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. a) Asociación  $R^2$  entre Limo y Factor K. b) Asociación  $R^2$  entre Arena Muy Fina y Factor K. c) Asociación  $R^2$  entre Arcilla y Factor K. d) Asociación  $R^2$  entre Materia Orgánica y Factor K. e) Asociación  $R^2$  entre Infiltración y Factor K. MO: Materia Orgánica.

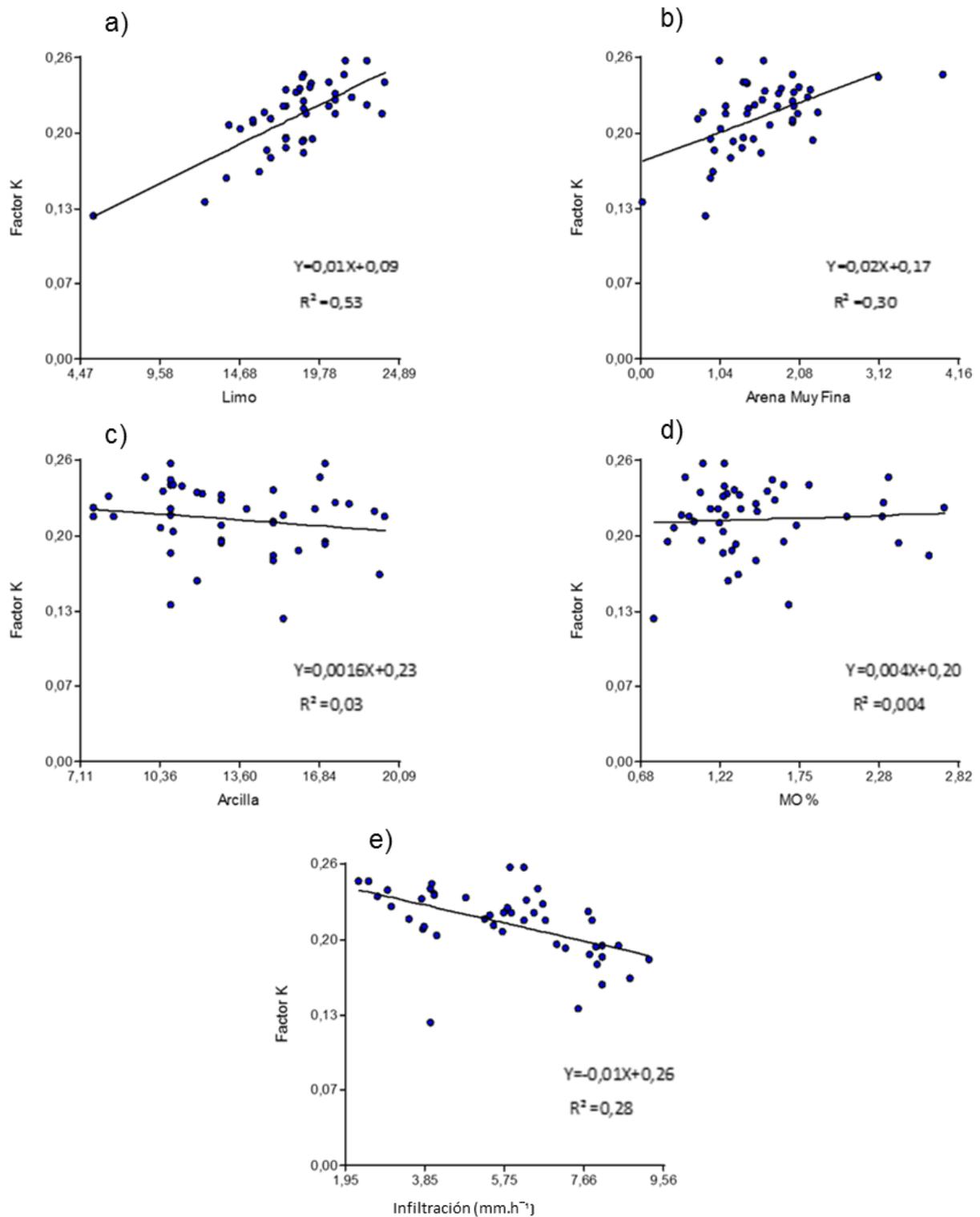
Como ya se expuso anteriormente, al analizar por separado a los sitios en base a su textura, se observó que en los sitios con textura Franco arenosa, el contenido de Limo posee el mayor ajuste entre las comparaciones  $R^2= 0,53$ .

Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de contenido de Limo y erodabilidad (K) (Figura 35.a). El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2= 0,53$ , es decir el 53% de la suma de los cuadrados totales (K) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente. Seguidos se encuentran los ajustes de  $R^2= 0,30$  y  $R^2= 0,28$ , pertenecientes a las variables de Arena Muy Fina e Infiltración respectivamente (Tabla 27). Considerando una relación positiva entre el contenido de arena muy fina y el factor K (Figura 35.b). Ocurriendo lo contrario entre la Infiltración (Figura 35.e), donde se observa una asociación negativa entre sus valores, lo que puede ser explicado solamente con el 28% de los datos (Tabla 27). También se observó una leve tendencia negativa entre el contenido de Arcilla y el Factor K (Figura 35.c), cumpliéndose con principios teóricos propuestos por Wischmeier et. al.1971, aclarando que el porcentaje de datos con esta tendencia es despreciable, por lo que no tuvo relevancia estadística (Tabla 27).

En la Figura 35.d se aprecia una relación neutra con tendencia a ser positiva entre el contenido de materia orgánica y el Factor K, lo que no puede ser probado debido al bajo ajuste encontrado entre los datos (Tabla 27). Ocurriendo similar relación en los sitios con texturas Arenosas francas discutidos anteriormente.

**Tabla 23:** Coeficiente de análisis de regresión entre el factor K y distintas variables de suelos con textura Franco Arenosa obtenidas para los diferentes sitios evaluados.

	A M F	Arcilla	Limo	Inf	MO
$R^2$	0,30	0,03	0,53	0,28	0,004



**Figura 35:** Coeficiente de análisis de regresión  $R^2$  entre variables evaluadas y el Factor K en sitios con textura franco arenosa. Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. a) Asociación  $R^2$  entre Limo y Factor K. b) Asociación  $R^2$  entre Arena Muy Fina y Factor K. c) Asociación  $R^2$  entre Arcilla y Factor K. d) Asociación  $R^2$  entre Materia Orgánica y Factor K. e) Asociación  $R^2$  entre Infiltración y Factor K. MO: Materia Orgánica.

En la serie Berón de Astrada, se observaron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) entre todos los usos presentes (Figura 36.a), los rangos de erodabilidad van de muy poco erodable a débilmente erodable. El uso Bosque Nativo ( $0,11 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) fue el mayor valor de la serie, comprobándose por el mayor valor en contenido de limo (7,1%), y menor valor de infiltración ( $54,77 \text{ mm.h}^{-1}$ ). Ocurriendo lo contrario en el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*), con el valor más bajo de K ( $0,02 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), siendo muy poco erodable, presentando el valor más bajo en contenido de limo (3,3%) (Ver Anexo II, Tabla 2. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Berón de Astrada) y el valor más alto de infiltración ( $327,1 \text{ mm.h}^{-1}$ ). Los casos intermedios corresponden a los usos Mandioca y Pasturas con valores de K de 0,04 y 0,06 ( $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) respectivamente, encontrándose similitud en el contenido de limo. Mientras que para la infiltración se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ). El uso Mandioca presentó la infiltración más alta ( $287,97 \text{ mm.h}^{-1}$ ) y el uso Pastura la más baja ( $87,4 \text{ mm.h}^{-1}$ ), probablemente debido al manejo del suelo en cada sitio.

En la serie Chavarría se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados en la serie (Figura 36.b). El uso Ganadería Extensiva presentó el mayor valor de erodabilidad ( $K = 0,07 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), con el menor valor de infiltración ( $108,3 \text{ mm.h}^{-1}$ ), (Figura 36.b) y el mayor contenido de limo (5,72%) (Ver Anexo 2, Tabla 3. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Chavarría) de la serie. Diferenciándose estadísticamente del uso Bosque Nativo ( $K = 0,03 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) y del uso Pastura ( $K = 0,02 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ). Clasificándose los tres usos evaluados como muy pocos erodables.

En la serie Chequín se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre el uso Arroz y Ganadería Extensiva (Figura 36.c). Logrando el mayor valor el uso Arroz ( $K = 0,21 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), presentado la menor infiltración ( $58,8 \text{ mm.h}^{-1}$ ), el mayor contenido de limo (16%) y el mayor contenido de arena muy fina (1,39%) (Ver Anexo 2, Tabla 4. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Chequín). Mientras que el uso Ganadería Extensiva ( $K = 0,17 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) presentó el menor valor. Ambos casos se clasificaron como medianamente erodables.

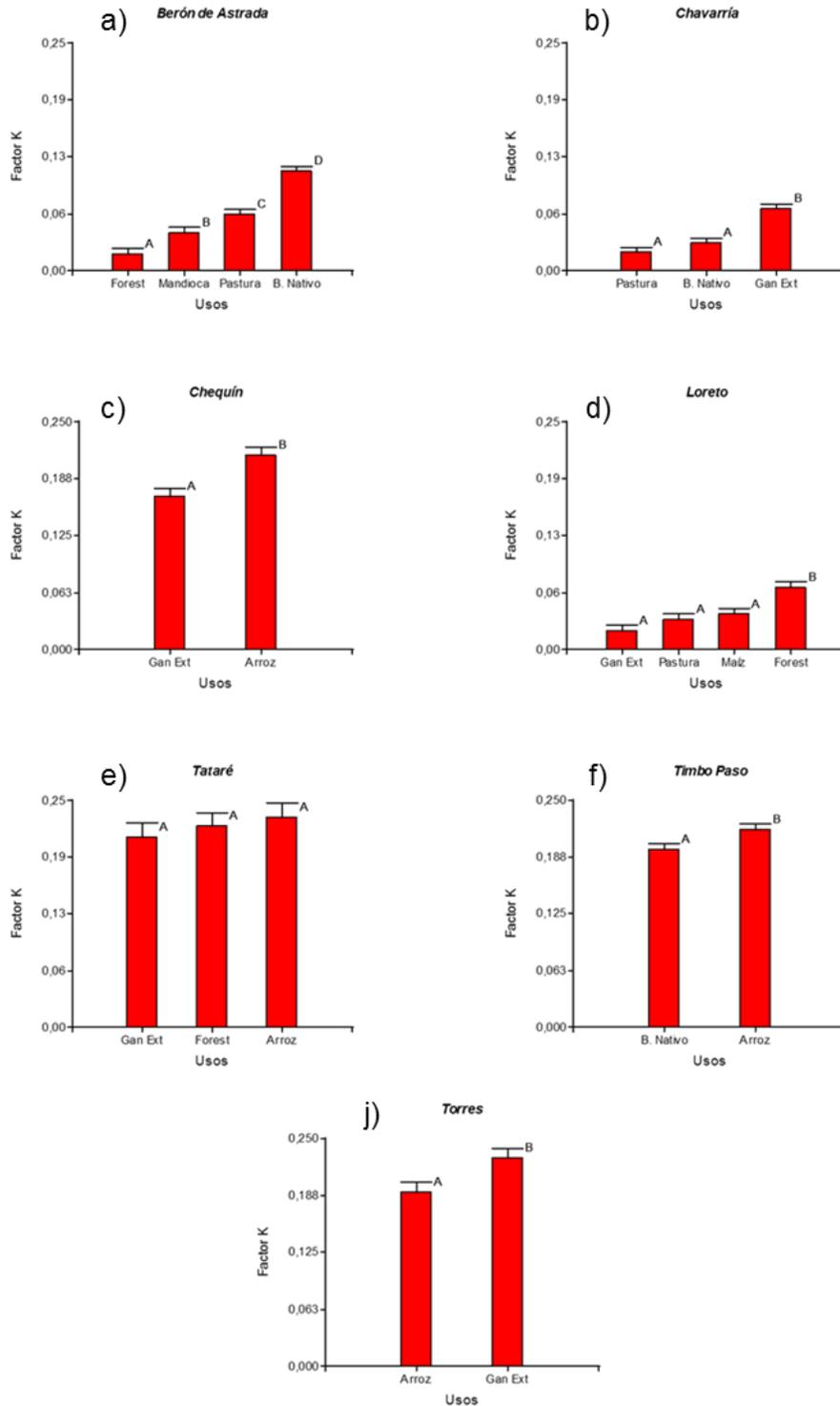
En la serie Loreto se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 36.d). El uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) ( $K = 0,07 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) fue el mayor valor calculado, presentando la menor infiltración ( $103,03 \text{ mm.h}^{-1}$ ) (Figura 36.d) y el mayor contenido de limo (6,48%) (Ver Anexo 2, Tabla 5. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Loreto).

En la serie Tataré no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los usos evaluados (Figura 36.e). Los valores de K estuvieron en el rango medianamente erodable.

En la serie Timbo Paso se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos Arroz y Bosque Nativo (Figura 36.f). Básicamente esta diferencia en el valor de K en el uso Arroz, está dado por el mayor contenido de limo (20,74 %), el mayor contenido de arena muy fina (1,48%) (Ver Anexo 2, Tabla 7. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Timbo Paso) y la menor infiltración ( $61,23 \text{ mm.h}^{-1}$ ), resultando así en un  $K = 0,22 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ , mientras que el uso Bosque Nativo presentó un  $K = 0,20 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ). Clasificando a ambos casos como medianamente erodables.

En la serie Torres se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos Arroz y Ganadería Extensiva (Figura 36.j). Se observó que el uso Ganadería Extensiva ( $K = 0,23 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), presentó el mayor valor. Observándose que posee el mayor contenido de limo (18,34%) y mayor contenido de arena muy fina (1,90%) (Ver Anexo 2, Tabla 8. Medidas de resumen de la textura de suelo para la serie Torres). Mientras que el uso Arroz ( $K = 0,19 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), obtuvo el menor valor de K. Clasificándose ambos usos como medianamente erodables.

Las asociaciones con altos valores de K coinciden con suelos de alto contenido de limo. Siendo los más susceptibles a procesos erosivos ya que producen encostramiento y alto escurrimiento.



**Figura 36:** Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Erodabilidad de suelos para los usos y series evaluados en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucalyptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*)).

### 5.5.2.3 Representación del Factor K (EUPS) en la cuenca:

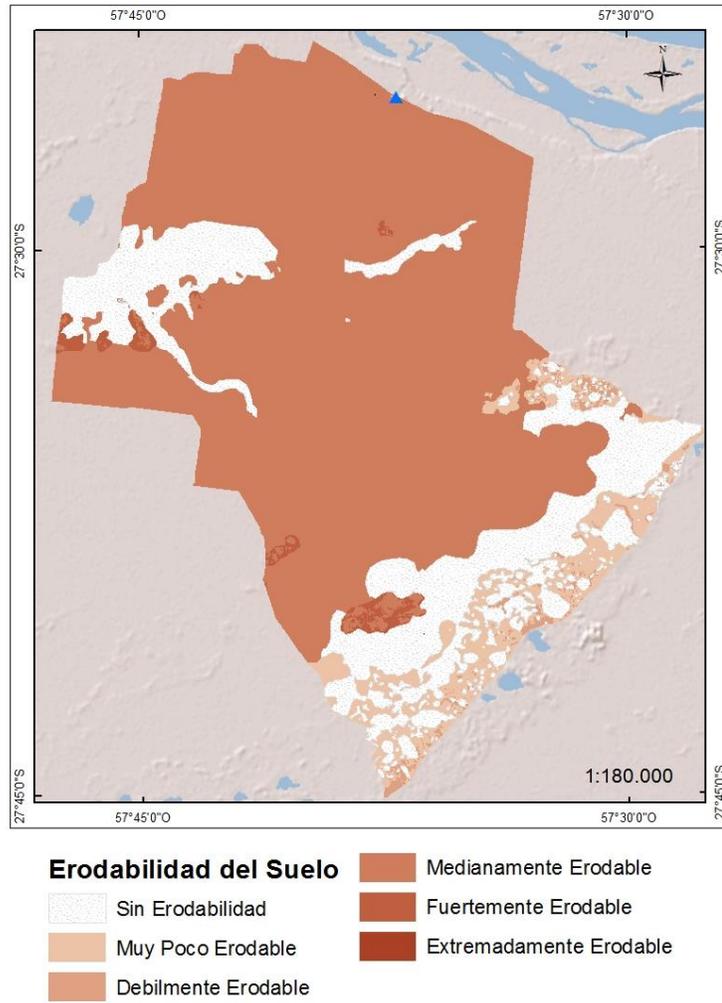
Se observó que 44691 hectáreas son medianamente erodable, significando el 70,35 % de la superficie de la cuenca. Es importante recalcar que la totalidad de la actividad arrocera se da sobre esta clase.

El 20,54 % (13128,84 hectáreas), pertenece a cuerpos de aguas permanente y semipermanente, perteneciente a la clase sin erodabilidad.

También se puede apreciar que el 7,92 % de la superficie de la cuenca pertenece a la clase débilmente erodable y muy poco erodable, siendo unas 5057 hectáreas, dato relevante ya que sobre la mayor parte de estas clases se asientan la mayoría de los usos agrícolas y forestales en la cuenca.

El 1,20 % (765,48 hectáreas), pertenece a la clase fuertemente erodable, perteneciendo a islotes de bosques nativos (Figura 37), de ahí su importancia a mantenerlos en pie.

El factor K se representa en la Figura 40.



**Figura 37:** Erodabilidad de suelos ( $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) de la Cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

## 5.6 Factor Topográfico: L (longitud de pendiente) y S (gradiente de pendiente).

Tanto el gradiente como la longitud de la pendiente influyen sobre las pérdidas de suelo por efecto de la escorrentía, mientras mayores sean la longitud y el gradiente, mayor es la pérdida de suelo, ya que el agua de escorrentía adquiere mayor velocidad y energía y el tiempo de contacto del agua con el suelo es menor, se reduce así la posibilidad de que el agua se infiltre en él.

Los resultados obtenidos para la serie Berón de Astrada mostraron que el uso con Bosque Nativo posee el valor más alto (LS=0,8519), seguido de los sitios con uso Pastura (LS= 0,2395) y con uso Forestación (LS=0,2285). Registrándose el menor valor en el caso del sitio con uso Mandioca (LS= 0,1231).

La serie Chavarría tiene como valores más elevados a los sitios con uso Pasturas y Bosque Nativo, ambos con valores iguales (LS= 0,5042), mientras que el uso Ganadería Extensiva posee el menor valor de la serie (LS= 0,3273).

En la serie Chequín el sitio con Arroz el LS fue de 0,2285, mientras que el sitio usado con Ganadería Extensiva tuvo un LS= 0,2005.

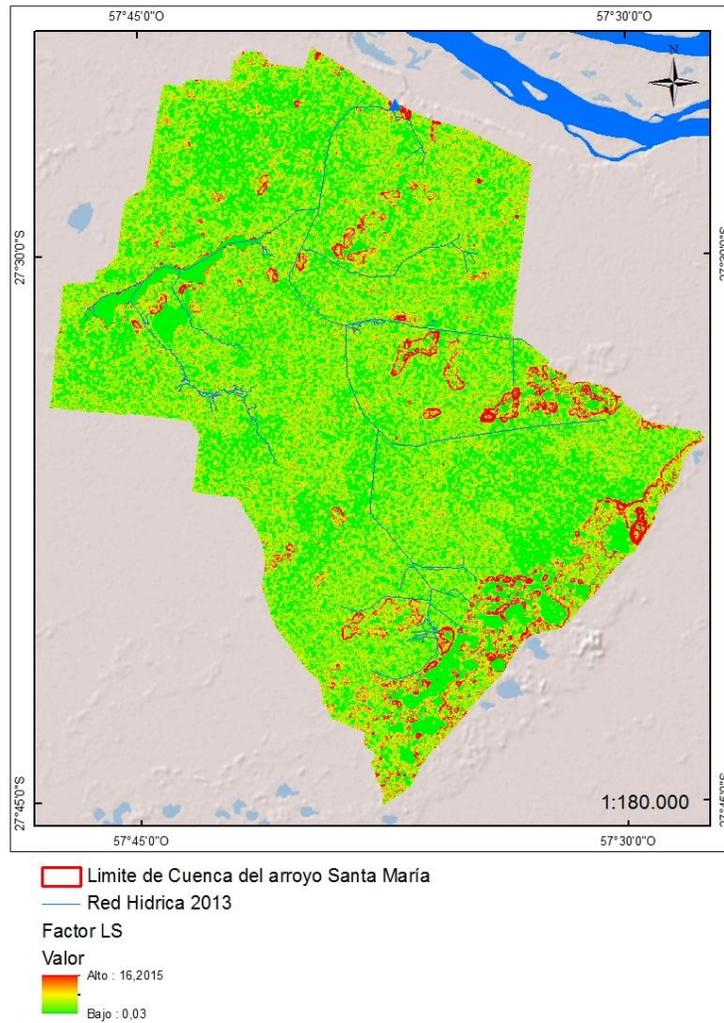
En la serie Loreto el sitio usado con Ganadería (LS= 0,4072) presentó el mayor valor, seguido a este con un valor de LS =0,1787 se encontró al sitio con Pastura, mientras que los sitios con Forestación y Maíz, obtuvieron los valores más bajos (LS= 0,1231) y (LS= 0,0957) respectivamente.

En la serie Tataré se registró que el mayor valor con el sitio forestado (LS= 0,4195), seguido del sitio usado con Arroz (LS=0,3697). Ocupando el valor más bajo el sitio usado con Ganadería Extensiva (LS= 0,2171).

El sitio usado con Arroz (LS= 0,4529) presentó el valor más alto comparándolo con el sitio usado con Ganadería Extensiva (LS=0,1701), dentro de la serie Timbo Paso.

La serie Torres presentó un LS de 0,1776 para el caso del sitio usado con Arroz, mientras que para el sitio usado con Ganadería Extensiva el LS fue de 0,1242.

En la Figura 38 se representan los valores calculados para toda la cuenca basándose en el Modelo de Elevación digital.



**Figura 38:** Factor LS de la Ecuación Universal de Perdidas de Suelos (EUPS). Fuente: elaboración propia.

Es necesario aclarar que existe la posibilidad que se tenga alguna sobreestimación de este factor debido a que el componente longitud de la pendiente (L) se consideró uniforme a lo largo de cada píxel. De acuerdo con el concepto de L, debería identificarse el punto en que la pendiente decrece hasta que ocurre sedimentación o el escurrimiento entra a una red de drenaje, condición requerida para que la EUPS pueda mejorar la precisión del factor LS en el SIG (Dunn y Hickey, 1998; Hickey, 2000). Estos autores mencionaron también la importancia que tiene la distancia entre píxeles del modelo de elevación digital, recomendándose resoluciones altas, es decir, distancia entre píxeles cortas, en particular cuando se tiene pendientes cóncavas, pues las depresiones inducen grandes errores, además del error generado por el cambio de escala y el ajuste del área mínima cartografiable.

## 5.7 Factor C de la ecuación universal de pérdidas de suelos (EUPS)

Para poder generar el valor correspondiente al factor C, fue necesario recurrir al mapa de uso de suelo generado a partir de la georreferenciación y digitalización de imágenes satelitales; de esta manera asignarle valores ya establecidos a cada uso encontrado en la cuenca.

El factor (C) en el caso del cultivo de arroz, fue de 0,06 tomado de Irurtia (2007), debido a que este valor corresponde a cultivos de grano fino en siembra directa, siendo similar al manejo y cobertura del cultivo de arroz, antes de inicio de riego, momento en el cual se realizó el muestreo. En el caso de campo natural con ganadería extensiva y forestación con eucaliptos se usaron los valores de 0,02 y 0,006 respectivamente; tomados de (Marelli, 2012). Para agricultura con labranza convencional como el maíz se tomó el valor de 0,30 perteneciente a monocultura de grano grueso con labranza convencional, tomados de (Irurtia, 2007). Del mismo modo para el caso de bosque nativo se designó el valor de 0,001; siendo similar a los valores de bosques designados por (Irurtia, 2007). Para los casos de horticultura a campo con labranza convencional y la mandioca con labranza convencional se asignó el valor de 0,5 (Mannaerts, 1999). Los valores del Factor C (EUPS) se pueden visualizar en la Tabla 28.

**Tabla 24:** Valores del factor C de la USLE tomados de Marelli, 2012 e Irurtia, 2007 para los usos de suelos evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

SERIES	USO DE SUELO	Factor C
Chequin	Arroz	0,06
	Ganadería extensiva	0,02
Tataré	Arroz	0,06
	Eucalipto	0,006
	Ganadería extensiva	0,02
Timbó Paso	Bosque nativo	0,001
	Arroz	0,06
Torres	Arroz	0,06
	Ganadería extensiva	0,02
Berón de Astrada	Mandioca	0,5
	Eucalipto	0,006
	Bosque nativo	0,001
	Pasturas	0,003
Loreto	Maíz	0,3
	Ganadería extensiva	0,02
	Eucalipto	0,006
Chavarría	Pasturas	0,003
	Ganadería extensiva	0,02
	Bosque nativo	0,001

## 5.8 Pérdida de suelo potencial en la Cuenca del Arroyo Santa María.

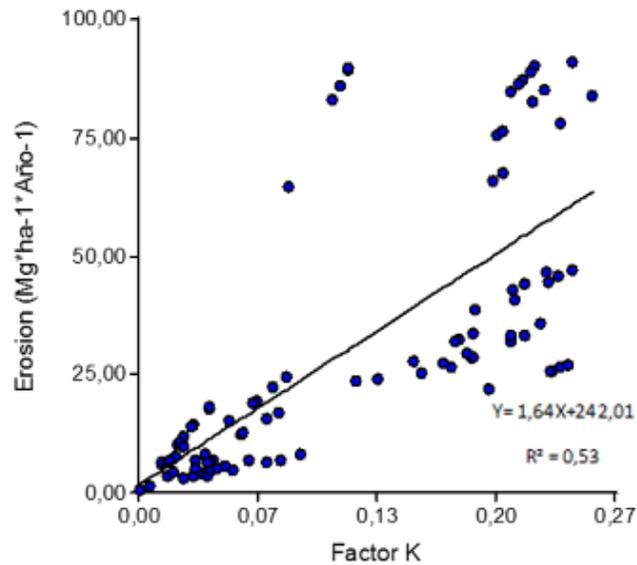
La Erosión Hídrica Potencial del suelo (Ap) constituida por los factores R.K.LS, sin considerar los factores C y P, se calculó para cada serie y uso evaluado en la cuenca (Figura 42). Realizándose posteriormente regresiones  $R^2$  entre los factores intervinientes y el producto de estos (Ap) (Figura 39 y 40). Aclarando que el factor R (erosividad) es constante en toda la cuenca, por lo que se priorizo solo al factor K y a los Factores L y S en conjunto. También se realizó una Correlación entre los factores K, LS y Ap (Tabla 29). Se observó que la Ap correlaciona en un 73% con los valores del Factor K. Mientras que el Factor LS solo se correlaciona con un 54% de los valores de Ap.

**Tabla 25:** Matriz de correlación (Pearson). Error 0,05%.

	Ap	K	LS
Ap	1	0	6,40E-09
K	0,73	1	0,57
LS	0,54	-0,06	1

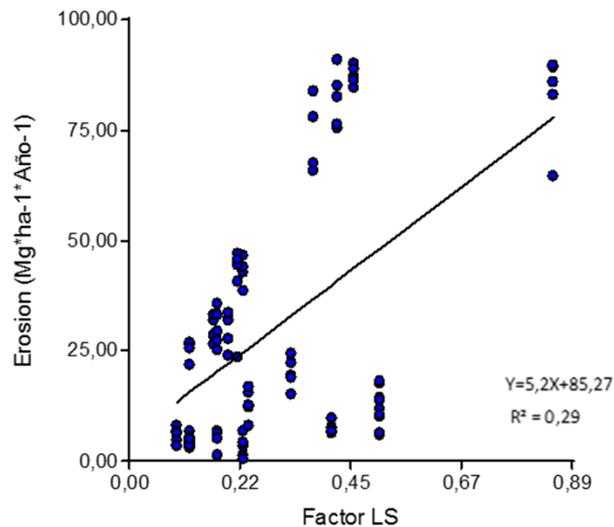
Ap= Erosión Hídrica Potencial. K= Factor K de la (EUPS). LS=Factor LS de la (EUPS).

En la Figura 39 se observa que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores del factor K y la Erosión. El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2 = 0,53$ , es decir el 53% de la suma de cuadrados totales de la variable dependiente (Erosión) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente. Incrementos en valores del Factor K repercuten de manera directa en aumentos de la Erosión Hídrica.



**Figura 39:** Coeficiente de análisis de regresión entre valores del Factor K y la Erosión Hídrica Superficial ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{Año}^{-1}$ ). Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral.

En la Figura 40 se observa que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores del factor LS y Ap. El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2 = 0,29$ , es decir el 29% de la suma de cuadrados totales de la variable dependiente (Erosión) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.



**Figura 40:** Coeficiente de análisis de regresión entre valores del Factor LS y la Erosión Hídrica Superficial ( $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Año}^{-1}$ ). Diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral.

La serie Berón de Astrada presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.a). Observando que el uso Bosque Nativo ( $A_p = 82,73 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), se diferenció del resto, presentando este el mayor valor de erosión hídrica de la serie, debido a que también presentó los mayores valores de K ( $0,11 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) y LS (0,8519). Mientras que el uso Pasturas también se diferenció estadísticamente del resto, presentando un  $A_p = 12,69 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ . Los sitios con usos Forestación (*Eucaliptus grandis*) ( $A_p = 4,03 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ) y Mandioca ( $A_p = 4,35 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), no se diferenciaron estadísticamente entre ellos, pero sí lo hicieron del resto de los sitios evaluados, coincidiendo con los menores valores de K y LS para la serie.

La serie Chavarría presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.b). Se observó que el sitio con uso Ganadería Extensiva presentó el mayor valor de Erosión Hídrica ( $A_p = 20,23 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), debido a que posee el mayor valor de K ( $0,07 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) calculado para la serie. Los usos Bosque Nativo ( $A_p = 13,35 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ) y Pastura ( $A_p = 8,90 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), presentaron los menores valores de  $A_p$ , diferenciándose del uso Ganadería Extensiva.

La serie Chequin presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.c) observándose que el uso Arroz ( $A_p = 42,36 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), es el mayor en comparación con el uso Ganadería Extensiva ( $A_p = 30,09 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ). Se observó que el uso Arroz presentó los mayores valores de K ( $0,21 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) y LS (0,2005) de la serie lo que influyó en el resultado final de pérdida de suelo para el uso Arroz.

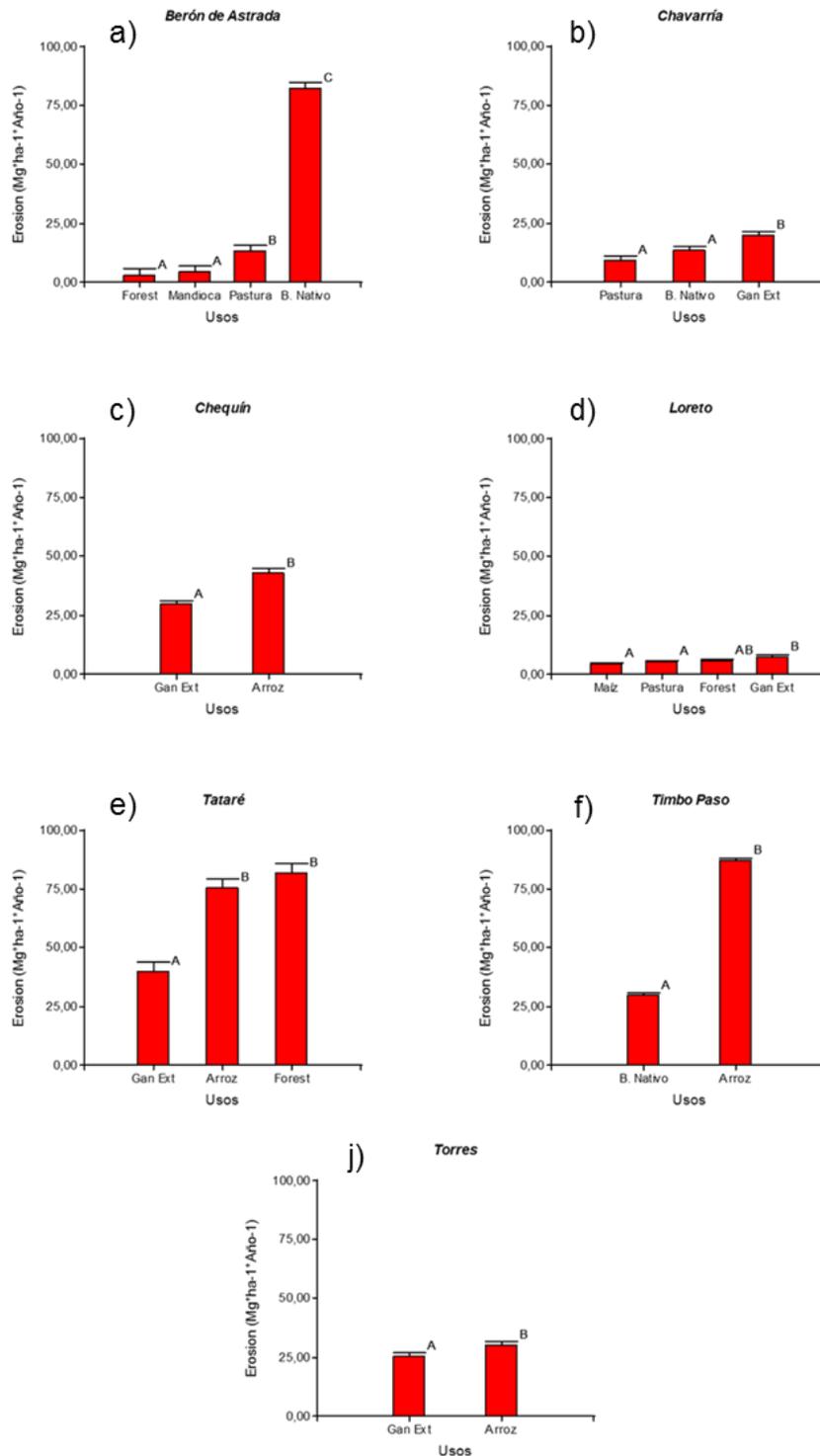
La serie Loreto presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ). Se observó que el uso Ganadería Extensiva ( $A_p = 7,19 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ) obtuvo el mayor valor de la serie (Figura 41.d). Relacionándose directamente con el Factor LS (0,4072), debido a que el K que presentó este sitio fue el más bajo de la serie. Mientras que el LS fue el más alto registrado en la serie. Los usos Pastura ( $A_p = 4,73 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ) y Maíz ( $A_p = 4,35 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), no se diferenciaron significativamente entre ellos, pero sí lo hicieron con la Ganadería Extensiva. El uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) ( $A_p = 5,91 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), no se diferenció estadísticamente del resto de los usos evaluados en la serie.

La serie Tataré presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.e). Se observó que el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) ( $A_p = 81,48 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), no se diferenció del uso Arroz ( $A_p = 75,07 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ). Mientras que estos dos se diferenciaron estadísticamente del uso Ganadería Extensiva ( $A_p = 40,25 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ). Observándose que el

uso Forestación (*Eucalyptus grandis*) presentó el valor más altos de K ( $0,22 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) y LS (0,4195), atribuyendo el mayor valor de Ap de la serie.

La serie Timbo Paso presentó diferencia estadística significativa ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.f). Se observó que el uso Arroz ( $A_p = 87,97 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), presentó el mayor valor de Ap, frente al uso Bosque Nativo ( $A_p = 30,03 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ). Observándose que el uso Arroz presentó el mayor valor de K ( $0,22 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) y LS (0,4529).

La serie Torres presentó diferencia estadística significativa ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 41.j). Se observó que el uso Arroz ( $A_p = 29,79 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ) presentó el mayor valor de Ap, mientras que el uso Ganadería Extensiva ( $A_p = 25,22 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ), obtuvo el valor más bajo. Si bien el K del uso Ganadería Extensiva es mayor ( $0,23 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ) que el K del uso Arroz ( $0,19 \text{ Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ ), el Factor LS del uso Arroz (0,1776) es mayor que el LS del uso Ganadería Extensiva (0,1242).



**Figura 41:** Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Erosión Hídrica Potencial calculada por la EUPS, para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucaliptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*)).

La Ap se encuentra distribuida en la cuenca como se muestra en la Figura 42; la Tabla 30, presenta el grado y la superficie con erosión. Aclarando que los valores utilizados para la representación gráfica fueron tomados de los cálculos realizados para los sitios evaluados en cuanto a serie y uso de suelo.

La clase Moderadamente Baja representa el 65,96% de la superficie de la cuenca (42161,9 hectáreas), que poseen pérdidas de suelo entre 20-50 Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>.

Las áreas en las que los valores de pérdidas de suelo por erosión son nulas o consideradas con valor 0, debido a la imposibilidad de realizar el cálculo mediante la metodología propuesta en este trabajo, representan el 20,54% (3128,84 hectáreas), perteneciendo a esta clase los cuerpos de aguas (esteros y lagunas).

La clase Moderadamente Alta con pérdidas de suelo entre 70-110 Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>, ocupa un 5,6% de la superficie (3430,7 hectáreas) en la cuenca.

La Clase baja con pérdidas de suelo entre 10 - 20 Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>, ocupa el 4,5% de la superficie de la cuenca, significando unas 2883,5 hectáreas.

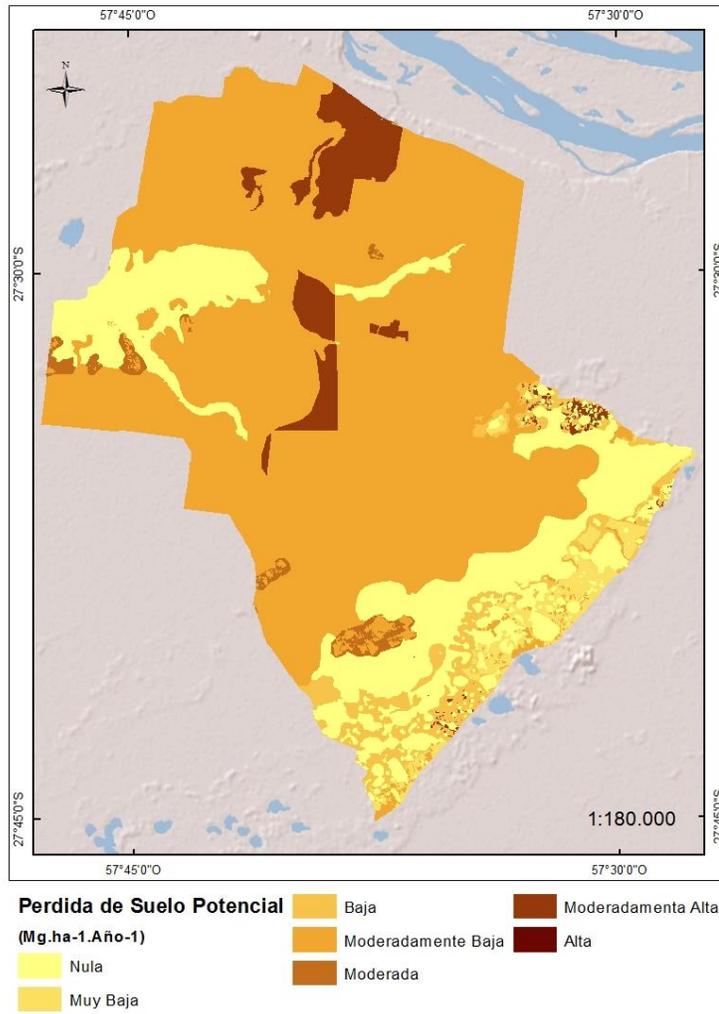
La clase pérdidas de suelo menores a 10 Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup> ocupan el 2,41% de la superficie de la cuenca (1542,5 hectáreas).

La clase moderada con pérdidas de suelo entre 50-70 Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>, ocupan el 1,19% de la superficie de la cuenca correspondiente a 765,48 hectáreas.

**Tabla 26:** Clasificación de la Erosión Hídrica Potencial en la cuenca.

Ap	Rango (Mg.ha <sup>-1</sup> .Año <sup>-1</sup> )	Área (ha)	% de Ocupación
Nula	0	13128,84	20,54
Muy Baja	0-10	1542,57	2,41
Baja	10--20	2883,52	4,51
Moderadamente Baja	20-50	42161,95	65,96
Moderada	50-70	765,48	1,19
Moderadamente Alta	70-110	3430,7	5,36
Alta	>110	0	0

\*Ap: Erosión Hídrica Potencial



**Figura 42:** Erosión Hídrica Potencial (Mg. ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>) en la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

### 5.8.1 Erosión Hídrica Actual

El producto de R.K.LS proporciona como resultado la Erosión Hídrica Potencial del área en cuestión y, la incorporación de los factores C y P típicos de la región permite estimar la Erosión Hídrica Actual (A); para esto los diferentes factores deben ser determinados localmente por medio de experimentación (parcelas de escorrentía), con una serie relativamente larga de datos, para que se alcance significación estadística (Wischmeier, 1976). Debido a la falta de parcelas experimentales en la zona de estudio y a la débil e inexistente disponibilidad de información en la región se acudió a distintas publicaciones logrando así hallar el valor del Factor C para cada uso identificado.

La distribución espacial de la erosión actual del suelo ( $A=R.K.LS.C.P$ ) se muestra en la Figura 43. La pérdida de suelo, la superficie afectada y grado de erosión se muestran en el Tabla 31.

**Tabla 27:** Clasificación de la Erosión Hídrica Actual en la cuenca.

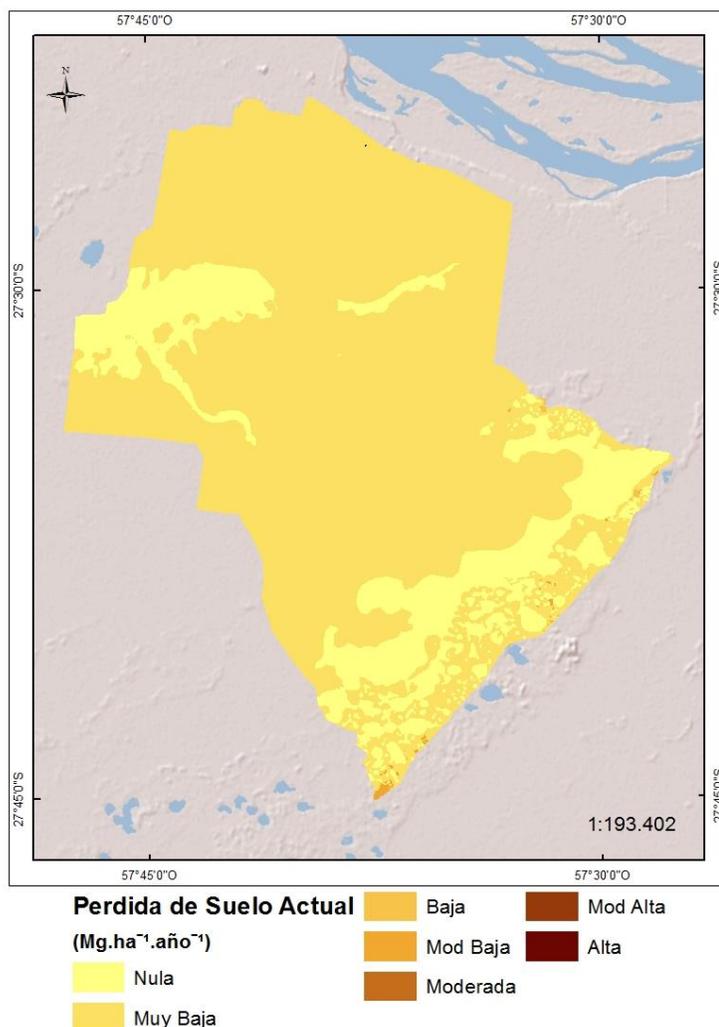
A	Rango ( $Mg.ha^{-1}.Año^{-1}$ )	Área (ha)	% de Ocupación
Nula	0	13128,8	20,54
Muy Baja	0-10	50652,4	79,25
Baja	10--20	89,1	0,14
Moderadamente Baja	20-50	42	0,07
Moderada	50-70	0	0
Moderadamente Alta	70-110	0	0
Alta	>110	0	0

\*A: Erosión Hídrica Actual

En los sitios donde la Erosión Hídrica Actual no fue calculada por medio de la EUPS, se consideró como erosión nula (cuerpos de aguas y lagunas), ocupando un 20,54% de la superficie de la cuenca (13128,8 hectáreas). La clase Muy Baja ocupa el 79,25% de la superficie de la cuenca (50652,4 hectáreas), siendo la clase con mayor ocupación. A esta sigue la clase Baja con 0,14% (89,1 hectáreas). Como última clase de pérdida de suelos se encuentra la clase moderadamente baja con 0,07% de la superficie (42 hectáreas).

Este tipo de resultados dan la oportunidad, a quienes desarrollan planes para el manejo de recursos naturales, de proyectar los cambios e inclusive modelarlos y evaluar su impacto antes de implementarlos, como en el manejo y desarrollo agrícola sostenible y la evaluación del riesgo

de erosión para el manejo de cuencas.. Las áreas agrícolas fueron asignadas con valores de C y P teniendo en cuenta los cultivos más representativos de cada región agroeconómica.



**Figura 43:** Erosión Hídrica Actual en (Mg.ha<sup>-1</sup>.Año<sup>-1</sup>) en la cuenca del arroyo Santa María. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 32 se detallan los valores de Ap y A calculados para las series y usos de suelos evaluados en la cuenca. Tomando como base valores de Factores calculados *in situ*. Donde se evidencia una relación inversa entre la cobertura, prácticas de manejo y la erosión del suelo Johnson y Blackburn (1989)

**Tabla 28:** Clasificación Erosión hídrica Potencial y Actual en la cuenca del arroyo Santa María

Series de suelos	Usos	Erosión Hídrica Potencial (Mg.ha <sup>-1</sup> .Año <sup>-1</sup> )	Clasificación	Erosión Actual (Mg.ha <sup>-1</sup> .Año <sup>-1</sup> )	Clasificación
Berón de Astrada	Bosque Nativo	82,28	Mod Alta	0,082	Muy Baja
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	3,11	Muy Baja	0,018	Muy Baja
	Mandioca	4,52	Muy Baja	2,26	Muy Baja
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	13,03	Baja	0,039	Muy Baja
Chavarría	Bosque Nativo	13,44	Baja	0,013	Muy Baja
	Ganadería Extensiva	19,88	Baja	0,39	Muy Baja
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	9,31	Muy Baja	0,02	Muy Baja
Chequín	Arroz	43,13	Mod Baja	0,517	Muy Baja
	Ganadería Extensiva	29,8	Mod Baja	0,596	Muy Baja
Loreto	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	5,74	Muy Baja	0,034	Muy Baja
	Ganadería Extensiva	7,46	Muy Baja	0,149	Muy Baja
	Maíz	4,18	Muy Baja	1,25	Muy Baja
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	5,13	Muy Baja	0,015	Muy Baja
Tataré	Arroz	75,62	Mod Alta	0,9	Muy Baja
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	81,99	Mod Alta	0,491	Muy Baja
	Ganadería Extensiva	40,23	Mod Baja	0,8	Muy Baja
Timbo Paso	Arroz	87,22	Mod Alta	1,04	Muy Baja
	Bosque Nativo	29,55	Mod Baja	0,029	Muy Baja
Torres	Arroz	30,06	Mod Baja	0,036	Muy Baja
	Ganadería Extensiva	25,13	Mod Baja	0,5	Muy Baja

## 5.9 Estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual sus partículas primarias, arena, limo y arcilla, se unen formando unidades secundarias, agregados, debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (Evans, C. 1997). Sin embargo, esta organización es dinámica y compleja y no muy bien comprendida (Lal & Shukla, 2004). Las distintas texturas y contenidos de materia orgánica explican las diferencias de estabilidad estructural entre suelos (Buschiazzo et al., 1991). La estabilidad de la estructura, es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990). Hénin et. al. (1958) indican que la estabilidad de los agregados del suelo está condicionada especialmente por la acción del agua como factor de degradación y por la cohesión en estado húmedo como factor de resistencia.

En la Tabla 33 se presentan los valores de Diámetros Medios Ponderados (DPMm) de los agregados estables al agua, obtenidos en sitios evaluados a partir de series y uso de suelos identificados en la cuenca. También se presenta una clasificación de la estabilidad de los agregados basada en su DPM.

**Tabla 29:** Clasificación del Diámetro Medio Ponderado de agregados estables al agua.

Series	Usos	Media	Clasificación de Estabilidad
Berón de Astrada	Bosque Nativo	0,87	Medio Estable
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	0,78	Inestable
	Mandioca	0,85	Medio Estable
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	2,2	Muy Estable
Chavarría	Bosque Nativo	0,92	Medio Estable
	Ganadería Extensiva	0,9	Medio Estable
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	1,01	Medio Estable
Chequín	Arroz	1,43	Estable
	Ganadería Extensiva	1,7	Estable

Loreto	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	0,53	Inestable
	Ganadería Extensiva	1,84	Estable
	Maíz	1,35	Estable
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	1,86	Estable
Tataré	Arroz	1,5	Estable
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	1,9	Estable
	Ganadería Extensiva	1,66	Estable
Timbo Paso	Arroz	1,6	Estable
	Bosque Nativo	1,13	Medio Estable
Torres	Arroz	1,99	Estable
	Ganadería Extensiva	2,42	Muy Estable

Se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los valores de DMPm en la serie Berón de Astrada (Figura 44.a). El uso Pastura (*Brachiaria brizantha*) (DMP=2,2 mm) posee la mayor estabilidad de la serie, clasificándose como muy estable frente a la erosión hídrica. Lo que podría estar muy relacionado al sistema radical de la pastura. El uso Mandioca (DMP=0,85 mm) y Bosque nativo (DMP=0,87 mm), presentan agregados medio estables según la clasificación propuesta por Le Bissonnais. Mientras que el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*), presentó la menor estabilidad frente al agua (DMP=0,78 mm), clasificándose como inestable. Siendo destacable la influencia del laboreo de suelos con implementos mecánicos como lo es la rastra de discos para el control de malezas en estos suelos con altos contenidos de arenas lo que genera alta susceptibilidad a la desagregación del suelo.

En la serie Chavarría no se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 44.b), clasificándose como agregados medio estables a todos los usos evaluados en esta serie. Es apreciable un leve aumento en el sitio con uso Pastura (*Brachiaria brizantha*) (DMP= 1,01 mm), mientras que los usos Bosque Nativo (DMP= 0,92 mm) y Ganadería Extensiva (DMP= 0,9 mm) presentaron DMP similares. Cabe mencionar que la pastura evaluada tenía 1 año desde la implantación, realizándose esta con labranza convencional (rastras de discos y dientes).

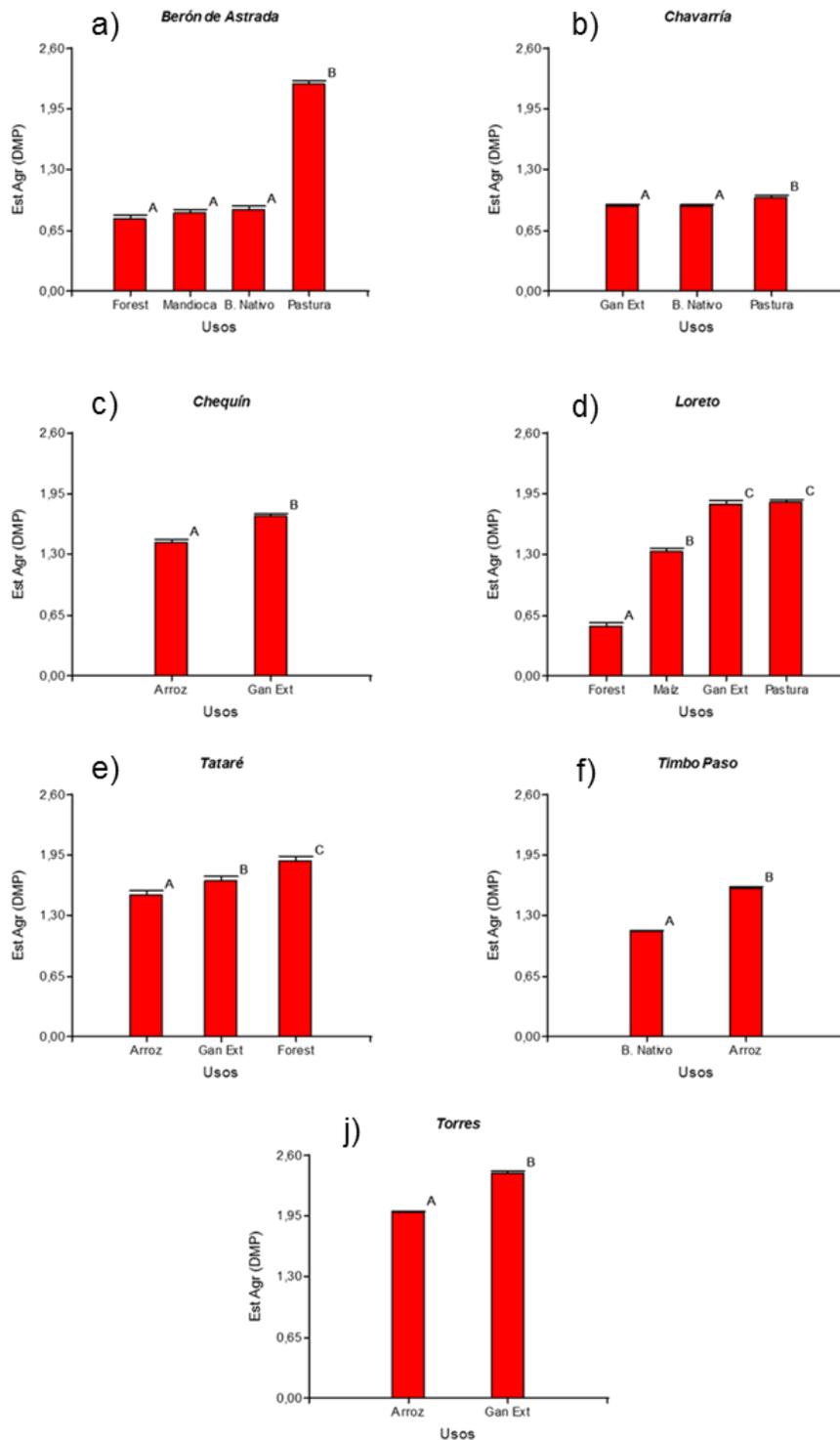
En la serie Chequin, se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ), entre los usos evaluados (Figura 44.c). El uso Arroz (DMP= 1,43 mm) menor valor de la serie. Mientras que el uso Ganadería Extensiva (DMP= 1,7 mm), presentó el mayor valor. Clasificándose como agregados estables frente a la acción del agua en ambos casos.

En la serie Loreto se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 44.d). Se observó que el uso Pasturas (*Brachiaria brizantha*) (DMP= 1,86 mm) y el uso Ganadería Extensiva (DMP=1,84 mm), no se diferenciaron entre ambos, pero sí lo hicieron con el resto de los usos evaluados. A su vez el uso Maíz (DMP= 1,35 mm), se diferenció del uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) (DMP= 0,53 mm). Clasificándose como agregados estables al agua a los usos Pastura (*Brachiaria brizantha*), Ganadería Extensiva y Maíz. Lo que no ocurrió con el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) presentando agregados inestables al agua. Dejando en claro el efecto que proporcionan el tipo de raíces y el laboreo de suelos en esta serie, ya que el control de malezas en el uso forestación fue realizado con rastras de disco. Si bien el uso maíz también se realiza bajo labranza convencional, el efecto que ejercen las raíces del maíz sobre la agregación es notable.

En la serie Tataré se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ), entre los usos evaluados (Figura 44.e). Se observó el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) (DMP= 1,9 mm) fue el mayor valor de la serie. Seguido por el uso Ganadería Extensiva (DMP= 1,66 mm). Mientras que el uso Arroz (DMP= 1,5 mm) obtuvo el menor valor de la serie. Clasificándose los tres usos evaluados como agregados estables frente a la acción del agua.

En la serie Timbo Paso se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 44.f). Se observó que el uso Arroz (DMP= 1,6 mm), clasificándose como agregados estables al agua. Mientras que el uso Bosque Nativo (DMP= 1,13 mm) fue el menor valor de las series clasificándose como agregados medio estables frente a la acción del agua.

En la serie Torres se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ), entre los usos evaluados en la serie (Figura 44.j). Se observó que el uso Ganadería Extensiva (DMP= 2,42 mm), presentó el mayor valor, clasificándose como muy estable frente a la acción del agua. Mientras que el uso Arroz (DMP= 1,99 mm) se clasificó como estable.



**Figura 44:** Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Estabilidad de Agregados (Le Bissonnais), para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Nativo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucaliptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*)).

## 5.10 Índice de Fertilidad Global

El índice de Fertilidad Global expresa el estado nutricional del suelo del sitio evaluado. Para ello, se realizó la comparación entre usos evaluados para cada serie de suelo presente en la cuenca.

En la Figura 45.a se observó la representación gráfica conjunta del diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de Materia Orgánica y el IFG. El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2= 0,30$ , es decir el 30% de la suma de los cuadrados totales (IFG) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.

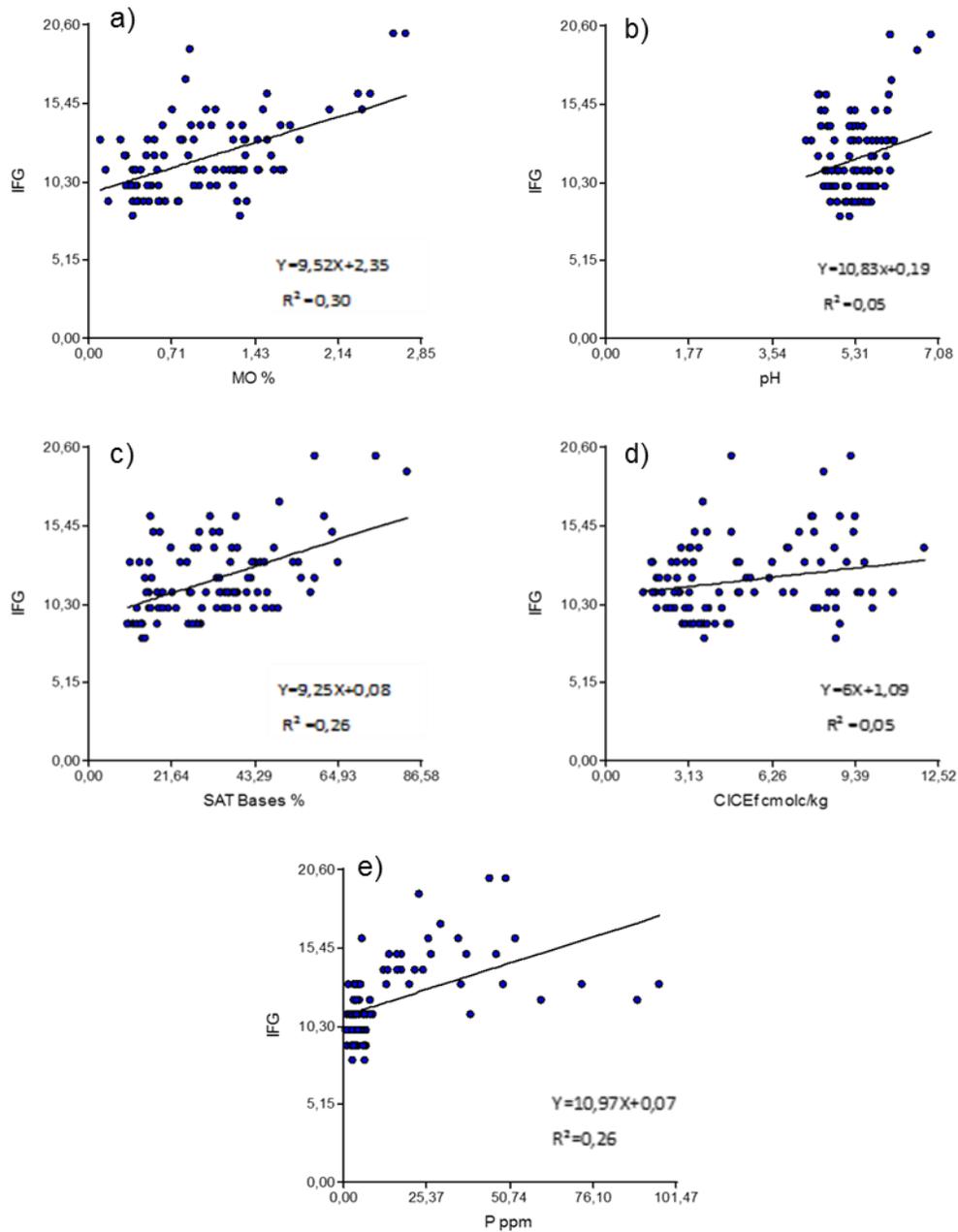
En la Figura 45.b se observó que la representación gráfica conjunta del diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de pH y el IFG. El coeficiente de determinación obtenido fue  $R^2= 0,05$ , es decir que solo el 5% de la suma de los cuadrados totales (IFG) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.

En la Figura 45.c se observó que la representación gráfica conjunta del diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de Saturación de Bases y el IFG. El coeficiente de determinación obtenido fue  $R^2= 0,26$ , es decir el 26% de la suma de los cuadrados totales (IFG) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.

En la Figura 45.d se observó la representación gráfica conjunta del diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y el IFG. El coeficiente de determinación obtenido fue  $R^2= 0,05$ , es decir solo el 5% de la suma de los cuadrados totales (IFG) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.

En la Figura 45.e se observó la representación gráfica conjunta del diagrama de dispersión, la recta de regresión estimada y el coeficiente de determinación muestral. Se observó que en el diagrama de dispersión existe una relación positiva entre los valores de contenido de fósforo (P ppm) y el IFG. El coeficiente de determinación obtenido es  $R^2= 0,26$ , es decir el 26% de la suma

de los cuadrados totales (IFG) es explicada, a través de una relación lineal, por la variación observada en la variable independiente.



**Figura 45:** Coeficiente de análisis de regresion R<sup>2</sup> entre variables evaluadas e Índice de Fertilidad Global. a) Asociación R<sup>2</sup> entre Materia Orgánica e IFG. b) Asociación R<sup>2</sup> entre pH e IFG. c) Asociación R<sup>2</sup> entre Saturación de Bases e IFG. d) Asociación R<sup>2</sup> entre Capacidad de Intercambio Catiónico e IFG. IFG: Índice de Fertilidad Global. MO: Materia Orgánica. SAT: Saturación de Bases de Intercambio. CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva

En la Tabla 34 se presentan la relación que existe entre las variables seleccionadas para calcular el IFG y el IFG propiamente dicho.

Se observa correlación positiva entre la MO y el IFG, donde el 55% del IFG puede ser explicado por la MO. De esta misma manera se puede decir que entre el contenido de fósforo (P) y el IFG también existe correlación positiva y que el 51 % del IFG puede ser explicado por el contenido de fósforo. Ocurren similar relación entre la Saturación de bases (SAT bases %) y el IFG, donde también se puede confirmar que el 51% del IFG puede ser explicado por la Saturación de bases.

**Tabla 30:** Matriz de correlación de Pearson entre variables calculadas para determinar el IFG y el IFG.

	pH	MO %	SAT Bases %	IFG	P ppm	CICEf (cmolc/kg)
pH	1	0,01	0	0,03	3,90E-03	6,40E-09
MO %	-0,28	1	0,45	2,70E-09	0,02	0
SAT Bases %	0,72	0,08	1	6,40E-08	0,14	0,01
IFG	0,22	0,55	0,51	1	4,50E-08	0,03
P ppm	-0,29	0,24	-0,15	0,51	1	0,05
CICEf (cmolc/kg)	-0,54	0,72	-0,27	0,22	0,2	1

En la Figura 46.a se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados. El uso Mandioca (IFG=14) y Bosque Nativo (IFG=14), se diferenciaron del uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) (IFG=12). El uso Pasturas (IFG= 12,4) no presentó diferencias estadísticas significativas con las demás situaciones. Todos los usos evaluados de la serie Berón de Astrada presentaron un nivel de fertilidad medio (Tabla 34). El uso Mandioca presentó el valor más alto de MO de la serie (0,96%), mientras que el uso Bosque Nativo presentó solo 0,63 %, elevando su IFG el alto contenido de fósforo (P=36,24 ppm).

En la Figura 46.b se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los sitios evaluados para tal serie. El uso Bosque Nativo (IFG= 13,8) registró el mayor valor de IGF, debido a que presentó el mayor contenido de MO (1,27), diferenciándose así del resto de los usos evaluados. Los usos Pasturas (IFG=10,2) y Ganadería Extensiva (IFG=9) no se diferenciaron entre ambos. Al clasificar los IFG, el uso Bosque Nativo se clasificó con fertilidad media, mientras que los usos Pastura y Ganadería Extensiva se clasificaron con fertilidad Baja (Tabla 35).

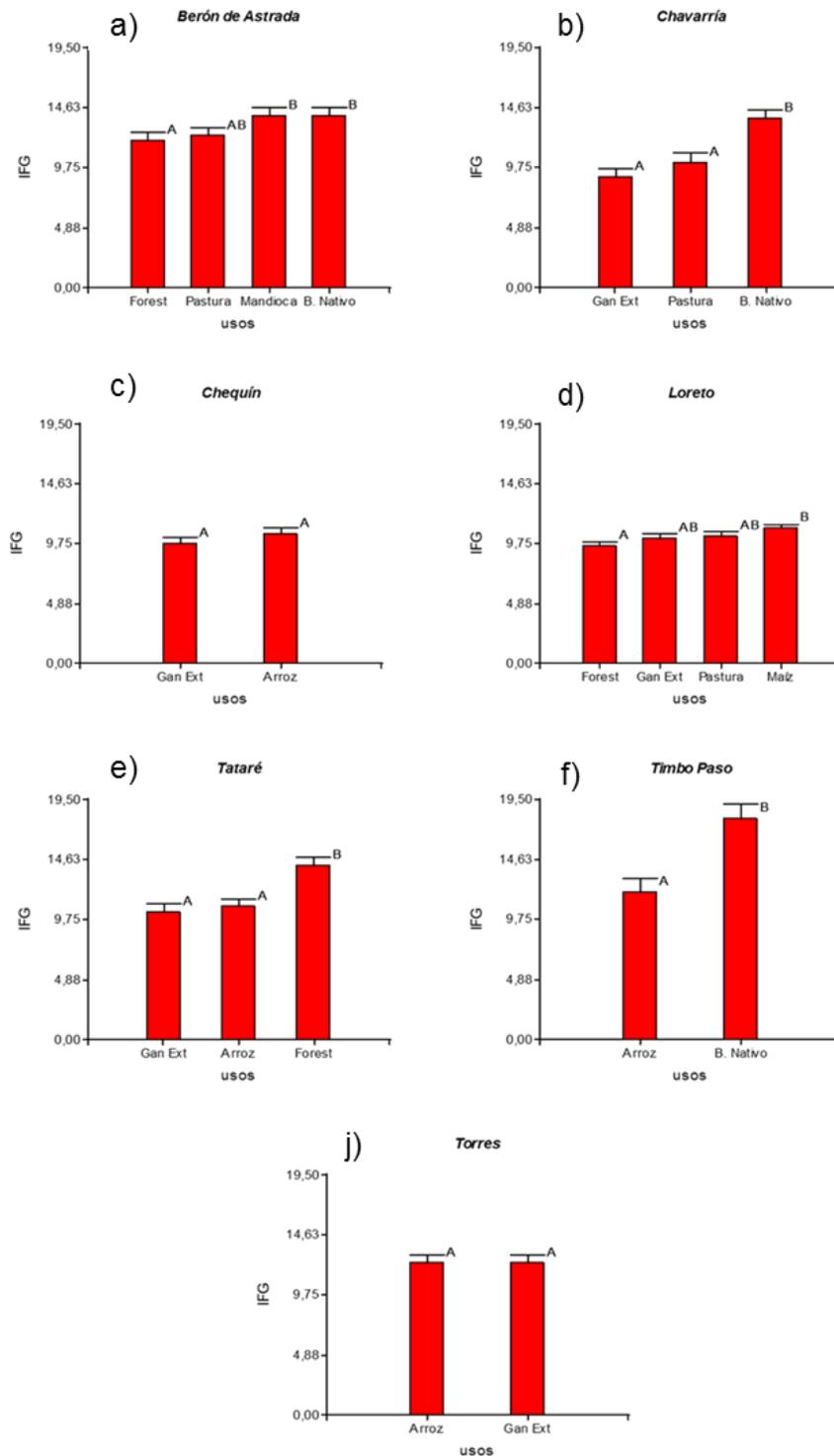
En la serie Chequin no se registraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 46.c). Los IFG calculados para el uso Arroz y el uso Ganadería Extensiva fueron 10,6 y 9,8 respectivamente. Clasificándose con fertilidad baja (Tabla 35).

En la Figura 46.d se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los sitios evaluados en la serie Loreto. El uso Maíz (IFG=11) y el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) (IFG=9,6) se diferenciaron estadísticamente. Mientras que el uso Ganadería extensiva (IFG=10,2) y Pasturas Megatérmicas (IFG=10,4), no se diferencian estadísticamente del uso Maíz; ni del uso Forestación *Eucaliptus grandis*). La diferencia entre el uso Maíz y el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*), básicamente está dada por el contenido de MO, favorable para el uso Maíz. Todos los sitios evaluados se clasificaron con fertilidad Baja.

En la serie Tataré se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 46.e). El uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) (IFG= 14,2) se diferenció de los usos Arroz (IFG= 10,8) y Ganadería Extensiva (IFG=10,4). Favoreciendo el mayor valor de IFG del uso Forestación (*Eucaliptus grandis*), el mayor contenido de MO. Al clasificarse los usos evaluados se observó que el uso Forestación (*Eucaliptus grandis*) presentó fertilidad Media. Mientras que los usos Arroz y Ganadería extensiva presentaron fertilidad Baja (Tabla 35).

En la serie Timbo Paso se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 46.f). El uso Bosque Nativo (IFG=18) presentó el mayor valor, debido a su mayor contenido de MO (1,93 %). Mientras que el uso Arroz (IFG=12) presentó el menor valor, presentando también el menor valor de MO (1,64). Clasificándose ambos con fertilidad Media (Tabla 35).

En la serie Torres no se registraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los usos evaluados (Figura 46.j). El uso arroz presentó un IFG= 12,4, al igual que el uso Ganadería Extensiva (IFG= 12,4). Los dos usos evaluados se clasificaron con fertilidad Media (Tabla 35).



**Figura 46:** Análisis de la varianza, test LSD Fisher, alfa 0,05. Índice de Fertilidad Global, para cada serie y uso de suelo evaluado en la cuenca. a) Serie Berón de Astrada. b) Serie Chavarría. c) Serie Chequín. d) Serie Loreto. e) Serie Tataré. f) Serie Timbo Paso. j) Serie Torres. Letras diferentes indican diferencias estadísticas. (Gan Ext: Ganadería Extensiva; B. Natvo: Bosque Nativo; Forest: Forestación (*Eucaliptus grandis*); Pastura: Pastura (*Brachiaria brizantha*)).

**Tabla 31:** Clasificación de valores de Índice de Fertilidad Global para los sitios evaluados según Ligier et. al. (2014)

Series	usos	IFG	Nivel de Fertilidad
	Bosque Nativo	14	Medio
Berón de Astrada	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	12	Medio
	Mandioca	14	Medio
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	12,4	Medio
Chavarría	Bosque Nativo	13,8	Medio
	Ganadería Extensiva	9	Bajo
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	10,2	Bajo
Chequín	Arroz	10,6	Bajo
	Ganadería Extensiva	9,8	Bajo
Loreto	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	9,6	Bajo
	Ganadería Extensiva	10,2	Bajo
	Maíz	11	Bajo
	Pastura ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	10,4	Bajo
Tataré	Arroz	10,8	Bajo
	Forestación ( <i>Eucaliptus grandis</i> )	14,2	Medio
	Ganadería Extensiva	10,4	Bajo
Timbo Paso	Arroz	12	Medio
	Bosque Nativo	18	Medio
Torres	Arroz	12,4	Medio
	Ganadería Extensiva	12,4	Medio

### 5.11 Pautas de Manejo de la cuenca hidrográfica

Considerando a la cuenca como unidad de planificación y gestión las propuestas que se dictan con el objetivo de conservar y o mejorar el estado del suelo, controlar la erosión y proteger la calidad de agua de los afluentes, son las siguientes:

- Evitar la profundización y canalización de las vías de escurrimientos de la cuenca ya que esto desencadena la formación de cárcavas a los márgenes de las vías.
- Planificar alternativas de producción considerando aptitudes de usos de los suelos seleccionados.
- Evitar desmontes en áreas donde los bosques nativos se localizan en situaciones de lomas y medias lomas, donde el grado y longitud de pendiente son determinantes para iniciar procesos erosivos.
- Evitar el laboreo de suelos, debido a la alta susceptibilidad que presentan los suelos de la cuenca al ser sometidos a labranzas convencionales.
- Promover el uso de siembras con labranza reducida, con el fin de alterar lo menos posible la cobertura vegetal del sitio.
- Incorporar rotaciones de cultivos, considerando los cultivos de cobertura como estrategias frente a la agregación del suelo y al incremento nutricional del suelo.
- Promover el empleo de análisis de suelos, logrando así una correcta fertilización de los mismos teniendo en cuenta la oferta y de manda de fertilizante por parte de los cultivos a implantar.
- Promover la implantación de pasturas en lotes forestales donde es común el empleo de rastras como control mecánico de malezas, facilitando así el mejoramiento de la agregación del suelo.

## 6 CONCLUSIONES

Mediante esta tesis se determinó con exactitud el límite de la cuenca del arroyo Santa María, lo que permitió el cálculo de sus parámetros morfométricos, área y red hidrográfica y la clasificación de su tendencia a la vejez evolutiva.

La utilización de imágenes satelitales permitió la representación geográfica del uso y coberturas de suelos en toda la cuenca. La evidencia satelital demostró que la actividad ganadera sobre campo natural representa la mayor superficie en la cuenca (67,57%), seguida por la actividad agrícola, donde el cultivo de arroz es la actividad predominante (18,84%). Por último, aunque con posibilidades de incremento futuro, están las pasturas megatérmicas que ocupan el 7% de la cuenca.

Esta tesis presenta mejoras en los cálculos de diferentes parámetros y fórmulas utilizadas para la cuantificación de la erosión hídrica. El empleo de mapas de suelos a escala de semi-detalle (1:50.000) junto con mapas de uso de suelos permitió el cálculo in situ de la erodabilidad (Factor K de la EUPS) con muy buena aproximación para cada serie y uso evaluado en la cuenca. El uso del entorno SIG y el modelo de elevación digital (MED), permitieron generar el mapa de los factores L y S de la EUPS.

Los cálculos de la Erosión Hídrica Potencial ( $A_p$ ) para cada serie y uso de suelo en la cuenca indicaron que el 73% de la variación de la  $A_p$  está explicada por los valores de la erodabilidad del suelo (Factor K), mientras que solo el 54% de los valores del grado y longitud de pendiente (Factores L y S) explican la  $A_p$ . Se comprobó que existe una relación directa y lineal entre aumentos de la Erosión Hídrica Potencial ( $A_p$ ) y aumentos de Factor K ( $R^2= 0,53\%$ ), estos aumentos del Factor K, están explicados en un 53% por el contenido de limo del suelo en una relación lineal con el Factor K. Lo que nos da la posibilidad a *priori* de estimar tasas de erosión de una misma combinación suelo-topografía-ubicación geográfica, bajo diferentes usos y manejos.

El cálculo de la Erosión Hídrica Actual para cada serie y uso de suelo evaluado permitió evidenciar que el 79% de la cuenca del arroyo Santa María presenta pérdidas de suelos muy bajas (inferiores a  $10 \text{ Mg. ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ ).

Los cambios en la estabilidad de agregados no pudieron ser explicada por diferencias texturales, mineralógicas, ni del estado orgánico de los suelos evaluados (ver ANEXOS VI, ítem 8.6.5). Posiblemente aspectos relacionados con el aporte de materia seca de los cultivos y su relación C:N, el tipo y estructura radical, sumado la actividad biológica y los años de usos agrícolas desde

la habilitación de los lotes, hayan influenciado en la estabilidad, pero no fueron cuantificados en este trabajo y deberían ser estudiados en el futuro.

La estabilidad de agregados fue sensible para discriminar situaciones de uso y manejo en las series de suelos de la cuenca. El DMP podría ser un buen indicador de calidad de suelo y reflejar por un lado las tendencias al deterioro, pero por otro también las tendencias a la recuperación cuando el suelo es expuesto a diferentes usos.

El índice de fertilidad global resultó ser un indicador significativo del estado nutricional del suelo. El contenido de materia orgánica, el contenido de fósforo y la saturación de bases explican la mayor parte de la variabilidad del índice.

En general los valores obtenidos en la cuenca varían entre niveles de fertilidad medios a bajos. Se comprobó que el índice de fertilidad global es un indicador sensible para comparar situaciones de diferente uso y manejo en los suelos de la cuenca del arroyo Santa María.

Se considera que la información generada es imprescindible y será de mucha utilidad, contribuyendo a la generación de políticas favorables a un desarrollo equilibrado y sostenible de la cuenca e inclusive la futura creación de un comité de cuenca.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Habiendo finalizado este trabajo quiero agradecer principalmente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), por financiar mis estudios y permitirme embarcarme en esta experiencia de enriquecimiento profesional y personal.

Al Grupo de Recursos Naturales de la EEA-INTA-Corrientes, por su apoyo desinteresado, paciencia y confianza en mí, para llegar a la conclusión de este trabajo. Al Laboratorio de suelos, agua y vegetales de la EEA-INTA-Corrientes por brindarme sus servicios y permitirme un lugar en sus inmediaciones para poder llevar a cabo los análisis correspondientes a este trabajo. A mi fiel compañero Joaquín Flores por su apoyo incondicional durante las salidas de campañas de muestreo y reconocimiento del sitio de estudio. A mi actual Jefe de Grupo y Director de Beca Ditmar Kurtz por su apoyo permanente e incondicional en este camino de la investigación, por su colaboración, por sus conocimientos compartidos, por sus consejos y por alentarme a continuar.

A mi Directora Fernanda Gaspari, por su colaboración, orientaciones y esclarecimiento en los temas que han sido invaluable en cada paso de este trayecto. A mi Co-Director Daniel Ligier, por ser mi mentor en mis inicios en el INTA y por encaminarme en esta etapa de aprendizajes y desafíos. A mis evaluadores Marcela Piscitelli, Luis Luque y Humberto Dalurzo, por el tiempo dedicado a la lectura minuciosa del trabajo y sus aportes para mejorar el producto final.

Agradezco también a todas las empresas y productores integrantes de la cuenca del arroyo Santa María, que felizmente abrieron sus puertas para poder llevar a cabo este trabajo.

Quiero agradecer a mi Padres, por inculcarme los valores suficientes para poder alcanzar las metas que siempre me propuse como profesional y como persona.

Finalmente agradecer a Emilia, Ignacio e Inés, por ser los motores de mi vida, siendo ellos el justificativo del esfuerzo y dedicación que pongo en mis objetivos y por quienes tengo el agrado de concluir este trabajo.

“No hay secretos para el ÉXITO, este se alcanza preparándose, trabajando y aprendiendo del fracaso.” *Colin Powell*

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Amézquita, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *Jour of Sustainable Agriculture* 14: 83-150.
- Amézquita, E. 1990. El agua y la erodabilidad de los suelos. En: *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos plantas y aguas para riego*. Memorias del Seminario Taller, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Santa Fe de Bogotá.
- Badano, N. 2010. *Modelación Integrada de Grandes Cuencas de Llanuras con Énfasis en la Evaluación de Inundaciones*. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. 42 pp.
- Barrow C. 1998. River basin development planning and management: a critical review. *World Development* 26(1): 171-186.
- Bauni, V.; Schivo, F.; Capmourteres, V. y Homber, M. 2015. Ecosystem loss assessment following hydroelectric dam flooding: The case of Yacyretá, Argentina.
- Beltrán, G., & Rosales, O. 2012. *Manual de Trabajos de Hidrología*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- BIANCHI, A.R.; Cravero, S.A.C. 2010. *Atlas climático digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Salta, Argentina.
- Brady, N.C. 1990. *The nature and properties of soils*. McMillan Publishing Company. New York, USA. 621 p.
- Brundtland, G. 1987. *Our common future: report of the world commission on environment and development*. Med. Confl. Surviv. Volume 4.300 pp.
- Buschiazzo, D. E., S. B. Aimar, A. R. Quiroga. 1991. Influencia de cementantes inorgánicos sobre la estabilidad estructural de suelos de la región semiárida pampeana central. *Actas XIII CACS*.
- Damiano, F.; Parodi, G.; Taboada, M. y Prieto Garra, D. 2017. Propuesta de Sistematización Agrohidrológica en Cuencas de Llanuras con Énfasis Predial y Consorciado. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 16. ISSN 1666-7719.
- Carnevalli. R. 1994. *Fitogeografía de la Provincia de Corrientes*. Gobierno de la Provincia de Corrientes - INTA. ISBN 950-43-6059-9. 326 pp.
- Casas, R. & Albarracin, G. 2015. *El Deterioro del Suelo y del Ambiente en la Argentina*. Buenos Aires. Tomo 2. 103 pp.
- Cassol E.; Silva T.; Foletto, F.; Levien R. 2018. Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. *Rev Bras Cienc Solo*. 42:0170262.
- Castro, G.; Perez Croce, E.; Arroyo, J. 1991. *Provincia de Corrientes. Caracterización Agroclimática de la Provincia de Corrientes*. 1ra y 2da Etapa. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires. 5 tomos.
- Cerda, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil Till. Res.*, 57: 159 -166 pp.
- De Ploey, J. y Poessen, J. 1985. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. *Geomorphology and Soils* (eds. K.S. Richards, R.R. Arnett y S. Ellis). Allen and Unwin, Londres. 99-120 pp.

- Desmet, P.; Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51:427-433.
- Dewis, J. y Freitas, F. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín nº 10, FAO. 252 p.
- Donnell J.; Woods R. 2004. On the need of catchment classification. *Journal of Hydrology* 299: 2-3pp.
- Doran, J. y Parkin, T. 1994. Defining and assessing soil quality. In: JW Doran, DC Coleman, DF Bezdicsek, and BA Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. No. 35, Soil Sci. Soc. Am., Am. Soc. Argon., Madison, WI. P.3-21.
- Dunn, M. y R. Hickey. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography* 27: 9-15.
- Ehlers, E. 1994. Agricultura sustentável: Orígenes e perspectivas de un novo Paradigma. Sao Paulo: Livros da Terra. p. 116.
- Engel, B.; Harbor, J.; Muthukrishnan, S.; Pandey, S, Kyoung, J.; Theller, L. 2005. L-THIA NPS. User Manual. Purdue University, United States Environmental Protection Agency. 46 pp.
- Escobar, E.; Ligier, H.; Melgar, R.; Matteio, R. y Vallejos, O. 1996. Mapa de Suelos de la provincia de Corrientes. 1:500.000. Convenio MAGIC - INTA. Recursos Naturales, EEA INTA Corrientes.
- Escobar, E.; Carnevali, R.; Contreras, H. J.; Melgar, R.; Vallejos, L.L.; Ortigoza, R. y Matteio, H.R. 1983. Los suelos y la vegetación del área de influencia de las obras de Yaciretá, provincia de Corrientes.
- Evans, C. 1997. Anthraquic Conditions in Nonagricultural Soils: A Proposal and Case Study. *Soil Science Society of America*. ISSN: 0361-5995. V. 61 nº 2. pp 556-559.
- Eyenari, M.; Shanan, L. and Tadmor, N.. 1971. *The Negev: The challenge of a desert*. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press. 345 pp.
- Fernández De Andrade, L. 2014. Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, vol. XXX, núm. 48, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 143-153 pp.
- Fertonani M. y Prendes H. 1983. Flatandas Hydrology. *Hidrologia de Grandes Llanuras* vol. 1. Fuschini Mejia M. (et). UNESCO. Argentina. 123-155 pp.
- Foster G.R., Meyer L.D., Onstad C.A. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope lengths exponents for soil loss estimates *Transactions of the ASAE*. pp. 683-687
- Foster, G.; Mccool, D.; Renard, K.; Moldenhauer, W. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to simetric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 36: 355-359.
- Gaitan, F.; Navarro, M.F.; Tenti Vuegen, L.; Pizarro, M.J.; Carfagno, P. y Rigo, S. 2017. Estimación de la Pérdida de Suelo por Erosión hídrica en la República Argentina.
- Gallego, F.; Alcaraz-Segura, D.; Baeza, S.; Altesor, A.; Bagnato, C.; Paruelo, J. 2011. Tendencias temporales y anomalías espaciales del funcionamiento ecosistémico en dos áreas protegidas de Uruguay. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.3127.
- García Nájera, J. 1962. *Principios de Hidráulica Torrencial*. Su aplicación a la corrección de torrentes. Madrid.

- Gaspari, F.; Senisterra, G.; Delgado, M.; Rodríguez Vagaría, A. y Besteiro. S 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición. La Plata. 321 pp.
- Gaspari, F.; Alfonso. M; Senisterra, G.; Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A. y Besteiro. S .2013. Elementos Metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata.
- Havlin, J.L. 1999. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. Prentice Hall. New Jersey, USA. 499 p.
- Herbst, R. 1971. Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes. República Argentina. Revista Asociación Geológica Argentina XXVI (2): 221-243.
- Hickey, R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. Cartography 29: 1-8.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I., Barrera, F. 2001. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile.
- ICONA. 1982. "Paisajes erosivos en el sureste español. Ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación", MAPA, Proyecto Lucdeme, Madrid.
- Ibáñez Asencio, S.; Moreno, R.; Gisbert Blanquer, J. 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas Universidad Politécnica de Valencia, España
- Irurtia, C.; Cruzate, G. y F. J. Gaspari. 2007. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica: Guía de divulgación técnica 1ª ed. Buenos Aires. 25 pp.
- Johnson, C. and Blackburn, W. 1989. Factor contributing to sagebrush rangeland soil loss. Trans. ASAE. 32: 155-160.
- Kay, B. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. Adv. Soil Science 12: 1-52.
- Kay, B. y Perfect, E. 1994. Structural Aspects of Soil Resilience. Department of Land Resource Science, University of Guelph. Guelph, Ontario, Canada. N1G 2W1. In: Soil Resilience and Sustainable Land Use. Chapter 25. 249-467pp.
- Kurtz, D.; Ligier, H.; Navarro Rau, F.; Sampedro, D.; Calvi, M. Bendersky, D. 2015. Superficie Ganadera y Carga Animal en Corrientes. Noticias y Comentarios. Número 58. ISSN 03273059.
- Kurtz, D. y Ligier, H. 2007. La carga ganadera "real" en la Provincia de Corrientes. Revista Tierra Correntina - Número IV. ISSN 18503594.
- Kurtz, D. 2016. Importancia del Cultivo y Zonas Arroceras. . En: Kurtz, D.; Araujo, j.; Fedre, J. (ED) Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para el Cultivo de Arroz en Corrientes. Serie Técnica nº2. Capítulo 1.13-18 pp.
- Lal, L. & Stewart, B.. 1992. Soil restoration. Needs for land restoration. Adv. Soil. Sci., 17, 1-10.
- Lal, R. and Shukla, M. 2004. Principles of soil physics. The Ohio State. University Columbus, Ohio, U.S.A. 2: 93-148.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. European J. Soil Sci., 47: 425-437.
- Le Bissonnais, .Y; Duval, O. y H. Gaillard. 2002. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. INRA Orléans, Unité de Science du Sol.

- Llamas, J. 1993. Hidrología general: Principios y aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España. 635 p.
- Lépre, E. 2007. Hacia una definición de la pobreza centrada en los derechos humanos: Aproximaciones conceptuales. IX Jornadas Argentinas de Estudios de Población. Asociación de Estudios de Población de la Argentina, Huerta Grande, Córdoba.
- Ligier, H.; Vallejos, O.; Perucca, R. y Matteio, H. 1998. La Erosión hídrica en la provincia de Corrientes. EEA INTA Corrientes. Recursos Naturales.
- Ligier, H.; Perruca, R.; Zini, E. 1999. Aptitud de tierras para Arroz Bajo Riego en Corrientes. EEA INTA Corrientes. Recursos Naturales.
- Ligier, H.; Matteio, H.; Garay, J.; Vallejos, O.; Inomata, S.; Barrios, A.; Ybarra, D.; Kurtz, D.; Perucca, C.; Peruca, A.; Sanabria, M.; Bernardi, M.; Rey Montoya, T.; Matteio, J.; Flores, L. y Lencinas, R. 2014. Evaluación de Tierras para el Cultivo de Caña de Azúcar en la Provincia de Corrientes. EEA INTA Corrientes. Recursos Naturales.
- Lobo, D. y Pulido, M. 2006. Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venezuelos* 14. 22-37 pp.
- Lopez Cadenas de Llano, F. 1998. Restauración Hidrológica forestal y control de la erosión. Ingeniería ambiental Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. pp 945.
- Mannaerts, C. 1999. Factores de erosión, Curso de postgrado en levantamiento de recursos hídricos, Cochabamba, Bolivia.
- Marín, A. 2016. Niveles Tecnológicos. En: Kurtz, D.; Araujo, J.; Fedre, J. (ED) Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para el Cultivo de Arroz en Corrientes. Serie Técnica n°2. Capítulo 3.22-27pp.
- McCool, D.; Foster, G.; Mutchler, C. and Meyer, L. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *TRANSACTIONS of the ASAE* 32(5):1571- 1576.
- McCool, D.; Brown, L.; Foster, G.; Mutchler, G. and Meyer, L. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *TRANSACTIONS of the ASAE* 30(5): 1387-1396.
- Medina Gonzalez, H.; García Coronado, J. y Nuñez Acosta, D. 2007. El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. Vol 3. N° 3. La Habana. Cuba.
- Mintegui Aguirre, J.; López Unzú, F. 1990. La Ordenación Agrohídrológica en la Planificación. Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. España. 306 pp.
- Montes, L.; Uribe E.; García, E. 2011. Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2: 5-17.
- Morgan P. 1997. Erosión y conservación de suelos. Madrid-España. Aedos. Natural Resources Conservation System (NRCS) 2004. Federal Standards for delineation of hydrologic unit boundaries.
- Ocampo R.; Medina C. y Lovaton G. 1996. Programa de conservación de suelos y forestación. Manual de conservación de suelos. Asociación Arariwa. Cuzco –Perú.

- Ordoñez Gálvez, J. 2011. Cartilla Técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica? Sociedad Geográfica de Lima, Perú
- Paoli C. & Giacosa R. 1983. Necesidades de Investigaciones Hidrológicas en Áreas de Llanuras. Hidrología de Grandes Llanuras vol.1. Fuschini Mejia M. (et). UNESCO. Argentina. 397-408 pp.
- Piscitelli, M; Varni., M; Sfeir, A; Ares, G (2010) Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul- Buenos Aires)1 Rev.Fac.Agron. Vol 109 (1): 17- 22.
- Rivera J.; LAL, J.; AMÉZQUITA, C.; MESA S.; CHAVES C. 2010. Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 61 (4): 344-357.
- Rodríguez Vargaría A. y Gaspari, F. 2015. Estimacion de la Admisibilidad de Perdidas de suelo por Erosión hídrica en la Cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenas Aires- Argentina. Revista Geográfica Venezolana, vol 56(1). Pp 105-119.
- Rojas A.; Codromaz D.; Conde, A., Moresco, R. 1976. Determinación del índice de erosividad de las lluvias para algunas localidades de Entre Ríos, Santa Fe y Buenos Aires. INTA IDEA. Suplemento N° 33. 709-713.
- Rojas, A.; Saluso, J. H. 1988. Estimación del factor "R" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para algunas localidades del norte de la República Argentina. Actas XII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo. Corrientes. pp 215-216.
- Saiz, J.; Vera Bravo, C. y Luna, C. 2014. Guía de Buenas Practicas Forestales para la Provincia de Corrientes. EEA-INTA Bella Vista. 1a ed.
- Santos Acuña, L. & González M. C. 1999. Mapa de Índices de Erodabilidad en la Cuenca Alta del Río Bogotá Utilizando el Sistema de Información Geográfica ARC-INFO™ 1. Revista de Ingeniería e Investigación. Colombia.
- Schoeneberger, P; Wysocki, D.; Benham, E.; and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.:
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental. México D.F. 360 p.
- USDA. 2000. Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos V.1.1. Centro Nacional de Relevamiento de Suelos. Lincoln. Nebraska. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Traducción de: Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras. Instituto de Suelos. C.R.N. I.N.T.A.
- Van Lynden, G. & Oldeman, L. 1997. The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen. The Netherlands.
- Verdin K. 1999. A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. Journal of Hydrology 218: 1-12pp.
- Von Der Weid, J. 1994. Agroecología y agricultura sustentable. Agroecología y Desarrollo, 7: 9-14. <http://www.clades.cl/revistas/7/rev7art2.htm>
- Tar buck E. & Lutgens, F. 1999. Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física. Prentice Hall, Madrid.

- Wanielista, M.; Kersten, R. Eaglin, R. 1997. Hydrology: Water quantity and quality control. 2a edición. John Wiley. New York.
- Wischmeier, W. & Mannering, J. 1969. Relation of Soil Properties to its Erodibility. Soil Sci. Soc. Proc., Vol. 33, pag. 131-136.
- Wischmeier W. & Smith D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook N° 537. Washington D.C. pp. 587

## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO I: MATERIA ORGÁNICA

**Tabla 1:** Medidas de resumen del contenido de materia orgánica (MO), n=5, encontrado en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	usos	Media	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	Mediana
Berón de Astrada	Bosque Nativo	0,63	0,17	27,11	0,38	0,84	0,64
	Forestación (Eucaliptus grandis)	0,2	0,1	46,75	0,1	0,33	0,16
	Mandioca	0,96	0,12	12,84	0,79	1,09	0,97
	Pastura (Brachiaria brizantha)	0,89	0,05	5,37	0,82	0,94	0,91
Chavarría	Bosque Nativo	1,27	0,36	28,15	0,65	1,53	1,34
	Ganadería Extensiva	0,64	0,09	13,61	0,53	0,77	0,62
	Pastura (Brachiaria brizantha)	0,36	0,13	35,56	0,18	0,52	0,38
Chequín	Arroz	1,14	0,12	10,4	0,96	1,27	1,16
	Ganadería Extensiva	1,43	0,22	15,1	1,24	1,68	1,3
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	0,4	0,05	13,51	0,33	0,48	0,4
	Ganadería Extensiva	0,38	0,02	6,02	0,34	0,4	0,38
	Maíz	0,53	0,08	14,22	0,45	0,6	0,57
	Pastura (Brachiaria brizantha)	0,5	0,05	9,72	0,42	0,55	0,51
Tataré	Arroz	1,19	0,28	23,67	0,91	1,65	1,11
	Forestación (Eucaliptus grandis)	1,79	0,53	29,45	1,22	2,35	1,73
	Ganadería Extensiva	1,07	0,2	18,58	0,78	1,26	1,09
Timbo Paso	Arroz	1,64	0,38	23,47	1,36	2,31	1,47
	Bosque Nativo	1,93	0,91	47,18	0,87	2,72	2,42
Torres	Arroz	1,49	0,33	22,49	1,24	2,07	1,34
	Ganadería Extensiva	1,5	0,23	15,25	1,24	1,82	1,54

\*D.V.: Desvío Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

## 9.2 ANEXO II: TEXTURA DE SUELOS

**Tabla 2:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Berón de Astrada, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Variabes	Media	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	Mediana
Berón de Astrada	Bosque Nativo	Arena Muy Gruesa	0,28	0,16	56,46	0,08	0,46	0,26
		Arena Gruesa	1,36	0,08	5,81	1,26	1,46	1,36
		Arena Media	37,75	6,4	16,95	31,48	48,06	36,6
		Arena Fina	33,42	15,76	47,15	6,44	45,52	38,32
		Arena Muy Fina	2,46	0,26	10,57	2,16	2,8	2,54
		Arena Total	81,68	2,26	2,77	79,2	85,4	81,3
		Arcilla	11,22	0,88	7,81	10,4	12,5	11,3
		Limo	7,1	1,69	23,8	4,2	8,3	7,4
	Forestación (Eucaliptus grandis)	Arena Muy Gruesa	0,39	0,25	64,85	0,02	0,7	0,36
		Arena Gruesa	1,29	0,29	22,66	0,78	1,52	1,38
		Arena Media	55,01	6,57	11,94	43,3	58,44	58,1
		Arena Fina	31,23	7,01	22,44	27,16	43,58	27,84
		Arena Muy Fina	2	0,36	18,09	1,5	2,4	2,1
		Arena Total	89,92	0,57	0,63	89,3	90,4	90,3
		Arcilla	6,78	1,31	19,33	5,5	8,6	6,5
		Limo	3,3	1,32	40,14	2,1	5,2	3,1
	Mandioca	Arena Muy Gruesa	0,46	0,06	12,68	0,38	0,52	0,48
		Arena Gruesa	1,53	0,16	10,71	1,34	1,72	1,5
		Arena Media	41,36	3,56	8,61	36,04	44,6	41,64
		Arena Fina	37,49	4,87	12,98	32,82	44,4	37,4
		Arena Muy Fina	3,38	0,42	12,34	2,76	3,86	3,5
		Arena Total	84,22	2,19	2,6	82	87	83
		Arcilla	9,9	1,85	18,64	7,6	11,8	9,7
		Limo	5,88	1,54	26,28	4,2	8,3	5,4
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Arena Muy Gruesa	0,06	0,02	29,88	0,04	0,08	0,06
		Arena Gruesa	1,51	0,21	13,7	1,3	1,76	1,5
		Arena Media	30,3	3,6	11,87	25,88	35,6	29,24
		Arena Fina	50,88	2,99	5,87	47,42	55,06	51,62
Arena Muy Fina		2,91	0,42	14,53	2,28	3,44	2,94	
Arena Total		85,66	0,82	0,96	85	87,1	85,4	
Arcilla		9,66	1,11	11,52	8,3	10,6	10,4	
Limo		4,68	1,6	34,23	2,3	6,3	4,6	

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 3:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Chavarría, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Variabes	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Chavarría	Bosque Nativo	Arena Muy Gruesa	0,16	0,04	26,52	0,1	0,2	0,16
		Arena Gruesa	1,78	0,23	12,66	1,56	2,16	1,72
		Arena Media	43,89	9,43	21,49	33,4	56,72	41,1
		Arena Fina	35,32	7,93	22,44	23,8	44,42	35,78
		Arena Muy Fina	2,67	0,81	30,37	2,22	4,12	2,34
		Arena Total	83,82	2	2,39	81,5	86,7	83,6
		Arcilla	10,74	1,18	10,99	9,1	12,2	11,1
		Limo	5,44	1,35	24,89	4,2	7,3	5,2
	Ganadería Extensiva	Arena Muy Gruesa	0,22	0,11	48,25	0,1	0,36	0,22
		Arena Gruesa	1,7	0,1	6,06	1,6	1,84	1,68
		Arena Media	37,2	3,25	8,72	32,4	40,8	37,9
		Arena Fina	43,17	4,11	9,53	37,42	47,66	44,98
		Arena Muy Fina	2,62	0,37	14,19	2,06	2,96	2,66
		Arena Total	84,92	1,41	1,67	82,9	86,7	84,7
		Arcilla	9,36	0,43	4,63	9,1	10,1	9,1
		Limo	5,72	1,33	23,3	4,2	7,7	5,2
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Arena Muy Gruesa	0,23	0,03	11,77	0,2	0,26	0,24
		Arena Gruesa	1,28	0,41	32	0,62	1,66	1,36
		Arena Media	44,93	4,26	9,49	40,24	49,08	47,3
		Arena Fina	38,33	4,93	12,86	33,5	44,3	35,74
		Arena Muy Fina	2,59	0,49	19,02	2,16	3,4	2,52
Arena Total		87,36	1,6	1,83	84,6	88,8	87,8	
Arcilla		9,02	0,54	5,99	8,1	9,5	9,1	
Limo		3,62	1,51	41,64	2,7	6,3	3,1	

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 4:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Chequin, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	VARIABLES	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Chequín	Arroz	Arena Muy Gruesa	0,45	0,16	36,16	0,22	0,64	0,52
		Arena Gruesa	2,5	0,43	17,26	2	3,16	2,4
		Arena Media	59,36	2,53	4,27	56,84	63,24	59,34
		Arena Fina	5,47	1,29	23,56	4,02	7,52	5,32
		Arena Muy Fina	1,39	0,46	33,27	0,82	2,02	1,36
		Arena Total	69,18	2,55	3,68	65,8	72,9	69,4
		Arcilla	13,28	2,22	16,74	10,8	16,7	12,9
	Limo	17,54	0,79	4,52	16,3	18,5	17,7	
	Ganadería Extensiva	Arena Muy Gruesa	0,52	0,15	29,95	0,36	0,74	0,54
		Arena Gruesa	5,58	4,07	72,96	2,48	12,28	3,28
		Arena Media	54,77	2,7	4,94	52,08	58,46	53,84
		Arena Fina	8,85	5,18	58,48	1,98	15,86	9,01
		Arena Muy Fina	0,95	0,56	59,02	0,04	1,48	0,98
		Arena Total	70,67	5,57	7,87	63,5	76,7	72,7
Arcilla		13,32	3,01	22,58	10,8	17,1	11,9	
Limo	16	2,8	17,5	12,5	19,4	16,5		

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 5:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Loreto, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Variables	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	Arena Muy Gruesa	0,07	0,04	57,6	0,02	0,12	0,08
		Arena Gruesa	1,08	0,06	5,79	0,98	1,14	1,08
		Arena Media	35,69	7,43	20,82	26,24	43,58	33,72
		Arena Fina	42,28	8,04	19,01	33,46	51,34	45,28
		Arena Muy Fina	2,62	0,22	8,51	2,4	2,96	2,66
		Arena Total	81,74	0,88	1,08	80,5	82,6	81,5
		Arcilla	11,78	0,91	7,74	11,1	13,2	11,2
		Limo	6,48	1,52	23,46	4,2	8,3	6,3
	Ganadería Extensiva	Arena Muy Gruesa	0,09	0,07	77,78	0,02	0,2	0,08
		Arena Gruesa	2,2	1,84	83,53	1,02	5,32	1,12
		Arena Media	43,64	7,2	16,5	35,8	51,9	46,94
		Arena Fina	38,24	8,08	21,14	27,54	46,72	35,66
		Arena Muy Fina	2,32	0,65	28,14	1,66	3,2	2,16
		Arena Total	86,48	0,74	0,86	85,4	87,5	86,5
		Arcilla	9,58	0,87	9,11	8,3	10,4	9,4
		Limo	3,94	0,88	22,31	3,1	5,2	4,1
	Maíz	Arena Muy Gruesa	0,07	0,05	69,72	0,04	0,16	0,06
		Arena Gruesa	1,51	0,21	13,7	1,3	1,76	1,5
		Arena Media	28,63	2,73	9,52	25,4	31,62	29,8
		Arena Fina	50,29	2,29	4,56	47,42	53,14	50,66
		Arena Muy Fina	2,83	0,42	14,87	2,28	3,44	2,82
		Arena Total	83,34	2,05	2,46	81,3	85,4	83,3
		Arcilla	10,84	1,88	17,32	8,3	13,5	10,6
		Limo	5,82	1,26	21,65	4	7,3	6,3
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Arena Muy Gruesa	0,1	0,07	68,15	0,02	0,2	0,08
		Arena Gruesa	1,43	0,3	20,87	1,2	1,9	1,28
		Arena Media	40,35	2,6	6,45	36,34	43,22	40,52
		Arena Fina	37,88	2,23	5,88	35,4	40	38,76
Arena Muy Fina		2,39	0,74	31,14	1,62	3,5	2,44	
Arena Total		82,14	2,69	3,28	77,4	83,6	83,6	
Arcilla		12,24	2,6	21,24	10,1	16,3	11,2	
Limo		5,62	1,41	25,11	3,1	6,3	6,3	

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 6:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Tataré, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Variabes	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Tataré	Arroz	Arena Muy Gruesa	0,49	0,15	31,43	0,26	0,66	0,54
		Arena Gruesa	2,5	0,23	9,04	2,18	2,74	2,46
		Arena Media	56,34	3,81	6,76	50,74	60,16	57,44
		Arena Fina	6,73	3,32	49,25	3,24	11,8	6,86
		Arena Muy Fina	1,3	0,4	30,5	0,76	1,7	1,36
		Arena Total	67,36	5,65	8,39	60	75,6	67,7
		Arcilla	12,82	3,04	23,75	10,4	17,1	10,8
		Limo	19,81	4,27	21,57	14	23,96	21,5
		Forestación (Eucaliptus grandis)	Arena Muy Gruesa	0,56	0,2	35,14	0,36	0,88
	Arena Gruesa		1,94	0,32	16,75	1,52	2,2	2,12
	Arena Media		53,36	2,91	5,45	49,18	57,16	53,34
	Arena Fina		8,44	3,05	36,15	5,26	12,36	6,94
	Arena Muy Fina		2,32	0,94	40,4	1,6	3,96	2
	Arena Total		66,62	4,6	6,91	61,7	71,5	68,8
	Arcilla		15,04	2,16	14,37	12,9	17,5	15
	Limo		18,34	2,76	15,04	15,6	21,4	18,3
	Ganadería Extensiva		Arena Muy Gruesa	0,48	0,16	33,93	0,32	0,66
		Arena Gruesa	2,8	0,48	17,25	2,04	3,26	2,78
		Arena Media	56,03	5,41	9,66	52,06	65,56	54,04
		Arena Fina	10,67	2,18	20,39	8,12	13,06	10,22
		Arena Muy Fina	1,76	0,62	35,05	0,86	2,32	2
Arena Total		71,74	4,33	6,03	68,3	79,2	70,4	
Arcilla		12,76	2,53	19,82	9,8	15,4	11,9	
Limo		15,5	5,76	37,18	5,4	19,3	17,7	

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 7:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Timbó Paso, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Variabes	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Timbo Paso	Arroz	Arena Muy Gruesa	0,44	0,29	65,71	0,18	0,78	0,34
		Arena Gruesa	2,45	1,52	62,07	1,4	5	1,76
		Arena Media	50,53	3,58	7,09	45,22	53,9	50,8
		Arena Fina	7,87	1,31	16,71	6,5	10,06	7,58
		Arena Muy Fina	1,9	0,3	15,95	1,42	2,2	2
		Arena Total	63,18	4,44	7,03	56,7	68,8	63,1
		Arcilla	16,08	3,97	24,66	10,8	19,5	18,1
	Limo	20,74	2,14	10,33	18,8	23,8	20,4	
	Bosque Nativo	Arena Muy Gruesa	0,69	0,16	22,94	0,52	0,92	0,66
		Arena Gruesa	3,32	0,71	21,36	2,54	4,26	3,38
		Arena Media	57,52	3,54	6,16	53,3	62,52	57,8
		Arena Fina	6,32	1,48	23,5	5,02	8,26	5,7
		Arena Muy Fina	1,48	0,52	34,91	0,92	2,26	1,5
		Arena Total	69,32	2,58	3,72	66,2	73,3	69,4
Arcilla		11,24	3,34	29,75	7,7	15	12,9	
Limo	19,44	2	10,29	17,7	22,9	18,8		

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 8:** Medidas de resumen estadístico de la Textura del suelo de los usos de suelo evaluados en la serie Torres, con n=5 Sitio de estudio cuenca del arroyo Santa María.

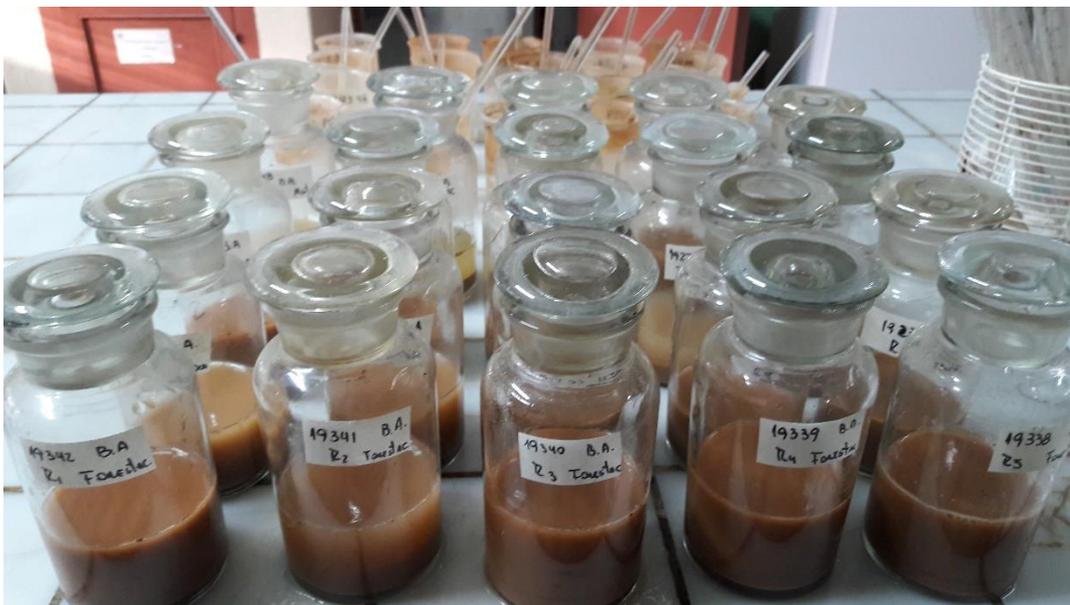
Series	Usos	VARIABLES	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Torres	Arroz	Arena Muy Gruesa	0,54	0,06	11,42	0,44	0,6	0,54
		Arena Gruesa	2,56	0,63	24,4	2,18	3,66	2,28
		Arena Media	58,82	4,4	7,48	53,72	63,9	60,88
		Arena Fina	6,54	1,76	26,9	4,6	8,94	6,44
		Arena Muy Fina	1,32	0,32	24,49	0,96	1,82	1,22
		Arena Total	69,78	3,71	5,31	64,2	73,5	70,4
		Arcilla	11,62	1,9	16,32	10,5	15	10,9
	Limo	18,6	2,24	12,04	16	20,8	18,7	
	Ganadería Extensiva	Arena Muy Gruesa	0,61	0,28	45,31	0,3	1	0,55
		Arena Gruesa	3,04	0,95	31,19	2,1	4,3	3,12
		Arena Media	54,5	9,99	18,33	41,7	65,58	51,38
		Arena Fina	8,09	6,38	78,81	2,44	19,06	6,44
		Arena Muy Fina	1,9	0,79	41,69	1,06	3,12	1,84
		Arena Total	68,02	6,44	9,46	62,1	76,9	66,3
Arcilla		13,64	5,02	36,8	8,3	19,3	15	
Limo	18,34	2,1	11,47	14,8	20,4	18,7		

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación



**Figura 47:** Destrucción de la materia orgánica mediante la digestión con agua oxigenada ( $H_2O_2$ ) y calor constante



**Figura 48:** Muestras de suelo listas para trasvase a probetas de vidrio



**Figura 49:** Dispersión de las muestras mediante un dispersor eléctrico



**Figura 50:** Determinación de la densidad mediante densímetro, colocado dentro de probetas de vidrio

### 9.3 ANEXO III: INFILTRACIÓN

**Tabla 9:** Medidas de resumen de la infiltración ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $n=5$ , encontrado en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana
Berón de Astrada	Bosque Nativo	54,77	8,9	16,25	44,5	60,3	59,5
	Forestación (Eucaliptus grandis)	327,17	54,72	16,72	285	389	307,5
	Mandioca	287,97	21,92	7,61	272,8	313,1	278
	Pastura (Brachiaria brizantha)	87,4	7,41	8,48	78,9	92,5	90,8
Chavarría	Bosque Nativo	131,93	6,57	4,98	126,2	139,1	130,5
	Ganadería Extensiva	108,33	20,87	19,27	84,8	124,6	115,6
	Pastura (Brachiaria brizantha)	141,87	18,61	13,12	126,6	162,6	136,4
Chequín	Arroz	58,8	10,89	18,52	48,5	70,2	57,7
	Ganadería Extensiva	79,2	3,29	4,16	75,4	81,2	81
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	103,03	25	24,26	78,1	128,1	102,9
	Ganadería Extensiva	292,63	20,19	6,9	271,2	311,3	295,4
	Maíz	637,27	67,53	10,6	561,4	690,8	659,6
	Pastura (Brachiaria brizantha)	222,9	19,47	8,74	200,5	235,8	232,4
Tataré	Arroz	60,07	5,35	8,91	55,2	65,8	59,2
	Forestación (Eucaliptus grandis)	33,13	8,78	26,51	23	38,6	37,8
	Ganadería Extensiva	31,7	7,63	24,07	25,2	40,1	29,8
Timbo Paso	Arroz	61,23	6,39	10,44	54,3	66,9	62,5
	Bosque Nativo	83,2	7,77	9,33	77,8	92,1	79,7
Torres	Arroz	74,3	12,42	16,72	63	87,6	72,3
	Ganadería Extensiva	40,87	0,75	1,84	40,1	41,6	40,9

\*D.V.: Desvío Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

**Tabla 10:** Clasificación de la infiltración en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María según USDA.

Series	Usos	Infiltración (mm.h <sup>-1</sup> )	Infiltración (cm.h <sup>-1</sup> )	Clasificación USDA	Clasificación numérica
Berón de Astrada	Bosque Nativo	54,77	5,47	MODERADA	3
	Forestación (Eucaliptus grandis)	327,17	32,7	RAPIDA	1
	Mandioca Pastura (Brachiaria brizantha)	287,97	28,7	RAPIDA	1
Chavarría	Pastura (Brachiaria brizantha)	87,4	8,74	MOD RAPIDA	2
	Bosque Nativo	131,93	13,19	RAPIDA	1
	Ganadería Extensiva Pastura (Brachiaria brizantha)	108,33	10,8	MOD RAPIDA	2
Chequín	Pastura (Brachiaria brizantha)	141,87	14,18	RAPIDA	1
	Arroz	58,8	5,8	MOD RAPIDA	2
	Ganadería Extensiva	79,2	7,9	MOD RAPIDA	2
	Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	103,03	10,30	MOD RAPIDA
Ganadería Extensiva		292,63	29,26	RAPIDA	1
Maíz		637,27	63,72	RAPIDA	1
Pastura (Brachiaria brizantha)		222,09	22,20	RAPIDA	1
Tataré	Arroz	60,07	6,07	MODERADA	3
	Forestación (Eucaliptus grandis)	33,13	3,31	MODERADA	3
	Ganadería Extensiva	31,7	3,17	MODERADA	3
Timbo Paso	Arroz	61,23	6,12	MOD RAPIDA	2
	Bosque Nativo	83,2	8,32	MOD RAPIDA	2
Torres	Arroz	74,3	7,43	MOD RAPIDA	2
	Ganadería Extensiva	40,87	4,08	MODERADA	3

### 9.3.1 MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN ALGUNOS DE LOS SITIOS EVALUADOS



**Figura 51:** Determinación de la Infiltración con infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Pasturas de 1 año de implantación sobre la serie de suelos Chavarría.



**Figura 52:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de *Eucalyptus grandis* de 5 años de implantación sobre la serie de suelos Loreto.



**Figura 53:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de *Eucalyptus grandis* de 3 años de implantación sobre la serie de suelos Berón de Astrada.



**Figura 54:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en Bosque Nativo sobre la serie de suelos Berón de Astrada.



**Figura 55:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Torres.



**Figura 56:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Ganadería Extensiva sobre la serie de suelos Torres



**Figura 57:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Chequin.



**Figura 58:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Arroz sobre la serie de suelos Timbó Paso.



**Figura 59:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en Bosques Nativos sobre la serie de suelos Timbó Paso.



**Figura 60:** Determinación de la Infiltración con Infiltrómetros de anillo simple, en lotes de Pasturas de 5 año de implantación sobre la serie de suelos Loreto.

## 9.4 ANEXO IV: ESTRUCTURA DE SUELOS

b: Grado de estructura del suelo, clasificación numérica basada en USDA, 2000.

- 1= Muy buena Estructura (granular muy fina; agregados de 1 mm de diámetro)
- 2= Buena Estructura (granular fina; agregados de 1 – 2 mm de diámetro)
- 3= Estructura Regular (granular media a gruesa; agregados de 2 – 10 mm de diámetro)
- 4= Estructura Mala (bloques, laminar o masiva; agregados de todos los tamaños)

**Tabla 9:** Tipo y grado de Estructura de suelo, en sitios evaluados en la cuenca de arroyo Santa María.

Series	Usos	Tipo de Estructura	Clasificación/Escala Numérica
Berón de Astrada	Bosque Nativo	Bloques angulares irregulares finos, Bloques subangulares medios/finos + grano suelto	3
	Forestación (Eucaliptus grandis)	Bloques angulares irregulares finos, Bloques subangulares medios/finos -comunes + Grano suelto	3
	Mandioca	Bloques subangulares finos/medios-comunes + Grano suelto	3
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Bloques angulares medios/finos-comunes, Bloques subangulares medios-comunes + Granular	3
Chavarría	Bosque Nativo	Bloques angulares irregulares finos-comunes, Bloques subangulares finos/medios-comunes + Grano suelto	3
	Ganadería Extensiva	Bloques angulares irregulares finos-escasos, Bloques subangulares finos/medios-comunes + Grano suelto	3
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Bloques subangulares medios-comunes + Granular	3
Chequín	Arroz	Bloques angulares regulares e irregulares medios, con bloques subangulares medios	4
	Ganadería Extensiva	Bloques angulares regulares escasos e irregulares medios/gruesos comunes con bloques subangulares medios/gruesos abundantes	4

Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	Bloques subangulares finos-comunes + Grano suelto	3
	Ganadería Extensiva	Bloques angulares irregulares finos-comunes, Bloques subangulares finos/medios-comunes + Grano suelto	3
	Maíz	Bloques subangulares finos/medios-comunes + Grano suelto	3
	Pastura (Brachiaria brizantha)	Bloques angulares irregulares finos-abundantes, Bloques subangulares finos/medios-comunes + Granular	3
Tataré	Arroz	Bloques subangulares medios/gruesos-comunes	4
	Forestación (Eucaliptus grandis)	Bloques angulares irregulares medios-escasos, Bloques subangulares medios-abundantes	4
	Ganadería Extensiva	Bloques angulares irregulares medios-comunes, Bloques subangulares medios-comunes	4
Timbo Paso	Arroz	Bloques angulares irregulares medios/finos-comunes, Bloques subangulares medios/gruesos-comunes	4
	Bosque Nativo	Bloques angulares irregulares medios-comunes, Bloques subangulares medios-comunes	4
Torres	Arroz	Bloques angulares irregulares medios-comunes, Bloques subangulares medios-comunes	4
	Ganadería Extensiva	Bloques angulares irregulares medios-comunes, Bloques subangulares medios-comunes	4

## 9.5 ANEXO V: EROSIÓN HÍDRICA

**Tabla 10:** Medidas de resumen de la pérdida de suelo potencial (A) por erosión hídrica, n=5 en sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Berón de Astrada	Bosque Nativo	82,28	10,39	12,62	64,36	89,51
	Forestación (Eucaliptus grandis)	3,11	2,43	78,17	0,24	6,49
	Mandioca	4,52	1,36	30,04	3,57	6,86
	Pastura (Brachiaria brizantha)	13,03	3,32	25,5	8,14	16,83
Chavarría	Bosque Nativo	13,44	2,92	21,71	10	17,74
	Ganadería Extensiva	19,88	3,5	17,6	14,98	24,22
	Pastura (Brachiaria brizantha)	9,31	5,27	56,58	5,78	18,08
Chequín	Arroz	43,13	3	6,95	38,39	46,56
	Ganadería Extensiva	29,8	3,98	13,35	23,96	33,59
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	5,74	1,79	31,18	3,35	7,8
	Ganadería Extensiva	7,46	1,26	16,87	6,17	9,44
	Maíz	4,18	1,1	26,33	2,74	5,42
	Pastura (Brachiaria brizantha)	5,13	2,33	45,47	1,09	6,73
Tataré	Arroz	75,62	8,7	11,51	65,53	83,65
	Forestación (Eucaliptus grandis)	81,99	6,43	7,84	75,28	90,77
	Ganadería Extensiva	40,23	9,61	23,89	23,53	46,95
Timbo Paso	Arroz	87,22	2,13	2,44	84,45	89,84
	Bosque Nativo	29,55	2,59	8,78	26,57	32,86
Torres	Arroz	30,06	4,32	14,37	25,16	35,76
	Ganadería Extensiva	25,13	1,97	7,85	21,7	26,65

\*D.V.: Desvío Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación

## 9.6 ANEXO VI: ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Procedimiento del método de Lebissonais, 1996.

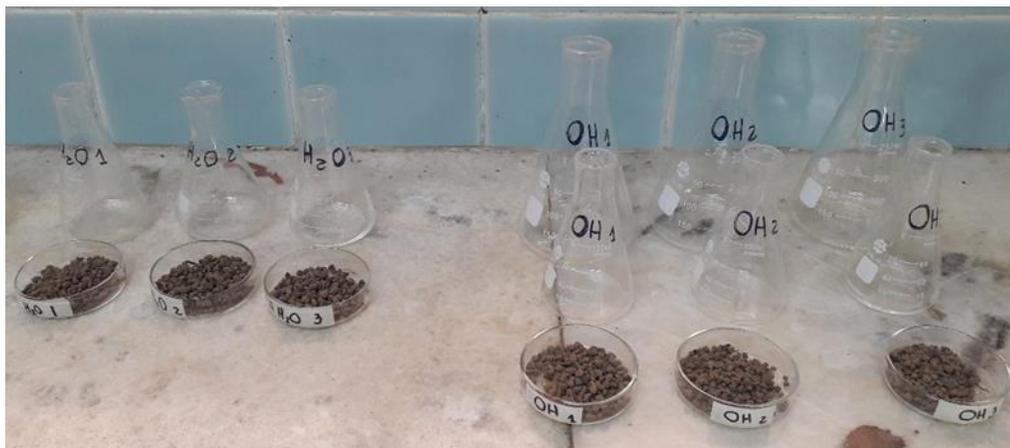
### 9.6.1 HUMECTACIÓN RÁPIDA, INMERSIÓN EN AGUA O EFECTO ESTALLIDO (DMPE).

Procedimiento:

- Verter 50 ml de agua destilada en un Erlenmeyer de 250 ml
- Verter la muestra de 10g de agregados de 5mm dentro del Erlenmeyer de 250 ml
- Dejar en reposo durante 10 minutos y observar los estallidos de los agregados
- Retirar el agua sobrante con la ayuda de una pipeta
- Transferir la muestra al tamizador FEODOROFF, mediante la ayuda de una piseta con etanol.



**Figura 61:** Muestra de 10 g de agregados de suelo tamizada en de tamiz de 5 mm



**Figura 62:** Muestra de 10 g de agregados de suelo previa humectación rápida con agua destilada y etanol

### 9.6.2 DISGREGACIÓN MECÁNICA POR AGITACIÓN DESPUÉS DE LA RE-HUMECTACIÓN EN ETANOL (DMPD)



**Figura 63:** Disgregación mecánica de agregados mediante el tamizador FEODOROFF.

#### Procedimiento:

- Verter 50 ml de etanol en un Erlenmeyer de 250 ml
- Verter la muestra de 10 grs de agregados de 5 mm dentro del Erlenmeyer de 250 ml
- Dejar en reposo durante 30 minutos
- Retirar el excedente de etanol con una pipeta
- Verter 50 ml de agua destilada en un Erlenmeyer de 250 ml
- Transferir los agregados sometidos al etanol, al Erlenmeyer con agua destilada, mediante la ayuda de una piseta con agua destilada
- Agitar manualmente el Erlenmeyer efectuando 10 giros
- Dejar en reposo durante 30 minutos y observar la decantación de la muestra
- Retirar el excedente de agua destilada con una pipeta
- Transferir la muestra al tamizador FEODOROFF, mediante la ayuda de una piseta con etanol.

### 9.6.3 HUMECTACIÓN LENTA CON AGUA POR CAPILARIDAD (DMPC)

Procedimiento:

- Colocar la muestra de 10 grs de agregados sobre papel de filtro, puesto sobre una tabla a succión con una depresión de 3 cm
- Dejar en reposo durante 60 minutos, dejando lugar a la re-humectación por capilaridad
- Transferir la muestra al tamizador FEODOROFF, mediante la ayuda de una piseta con etanol.



**Figura 64:** Muestras de 10 g de agregados en bandeja de humectación lenta con agua por capilaridad.

#### 9.6.4 MEDICIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS RESULTANTES:

Procedimiento:

- La primera etapa consiste en someter las muestras a 5 movimientos helicoidales sucesivos, mediante el tamizador FEODOROFF, (Figura 11), sumergiendo el tamiz de 50 micrones a un recipiente lleno de etanol, realizando así una primera separación granulométrica.
- Retirar el resto de la muestra (fracción mayor a 50 micrones), colocándola en una capsula de vidrio, con la ayuda de una piseta con etanol
- Llevar a estufa a 40 ° C, durante 48 horas
- Tamizar la muestra seca en una columna de tamices con el fin de lograr la distribución de agregados para los tamaños >2.000 μm, 2.000-1.000 μm, 1.000-500 μm, 500-200 μm, 200-100 μm y 100-50 μm. La fracción menor a 50 micrones se obtiene por deducción en relación al peso inicial.
- Calcular el Diametro Medio Ponderado (DPM) de cada pretratamiento, luego de la desagregación (valores comprendidos entre 0.025 mm y 3,5 mm), el mismo se obtuvo como la suma algebraica de las masas de las fracciones remanentes de cada tamiz, multiplicado por la apertura de los tamices adyacentes, como lo indica la siguiente fórmula:

$$\Sigma [\text{Diámetros medios entre dos tamices (mm)} * [\% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz}]] / 100$$

O bien:  $[3,5 * (\% > 2 \text{ mm})] + [1,5 * (\% 2-1 \text{ mm})] + [0,75 * (\% 1-0,5 \text{ mm})] + [0,35 * (\% 0,5-0,2 \text{ mm})]$   
 $+ [0,15 * (\% 0,2-0,1 \text{ mm})] + [0,075 * (\% 0,1-0,05 \text{ mm})] + [0,025 * (\% < 0,05 \text{ mm})] / 100$

**Tabla 11:** Medidas de resumen del Diámetro Medio Ponderado de agregados de suelo estables al agua, n=3, en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	Usos	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Berón de Astrada	Bosque Nativo	0,87	0,06	6,71	0,83	0,94
	Forestación (Eucaliptus grandis)	0,78	0,06	7,14	0,73	0,84
	Mandioca	0,85	0,06	6,51	0,79	0,9
	Pastura (Brachiaria brizantha)	2,2	0,21	9,66	2,05	2,44
Chavarría	Bosque Nativo	0,92	0,08	8,33	0,85	1
	Ganadería Extensiva	0,9	0,03	3,56	0,88	0,94
	Pastura (Brachiaria brizantha)	1,01	0,08	8,04	0,92	1,07
Chequín	Arroz	1,43	0,03	2,24	1,41	1,47
	Ganadería Extensiva	1,7	0,11	6,63	1,63	1,83
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	0,53	0,03	4,72	0,51	0,56
	Ganadería Extensiva	1,84	0,01	0,31	1,83	1,84
	Maíz	1,35	0,2	14,76	1,23	1,58
	Pastura (Brachiaria brizantha)	1,86	0,01	0,54	1,85	1,87
Tataré	Arroz	1,5	0,18	12,2	1,36	1,71
	Forestación (Eucaliptus grandis)	1,9	0,12	6,09	1,83	2,03
	Ganadería Extensiva	1,66	0,13	7,85	1,56	1,81
Timbo Paso	Arroz	1,6	0,03	1,58	1,57	1,62
	Bosque Nativo	1,13	0,05	4,53	1,09	1,19
Torres	Arroz	1,99	0,05	2,57	1,95	2,05
	Ganadería Extensiva	2,42	0,04	1,57	2,39	2,46

\*D.V.: Desvió Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación



**Figura 65:** Tamización y clasificación de muestras secas luego de la dispersión, con tamices de  $>2.000 \mu\text{m}$ ,  $2.000-1.000 \mu\text{m}$ ,  $1.000-500 \mu\text{m}$ ,  $500-200 \mu\text{m}$ ,  $200-100 \mu\text{m}$  y  $100-50 \mu\text{m}$

9.6.5 RELACION DEL DIAMETRO MEDIO PONDERADO (DMP) Y EL CONTENIDO DE ARCILLA, LIMO, ARENA MUY FINA Y MATERIA ORGANICA

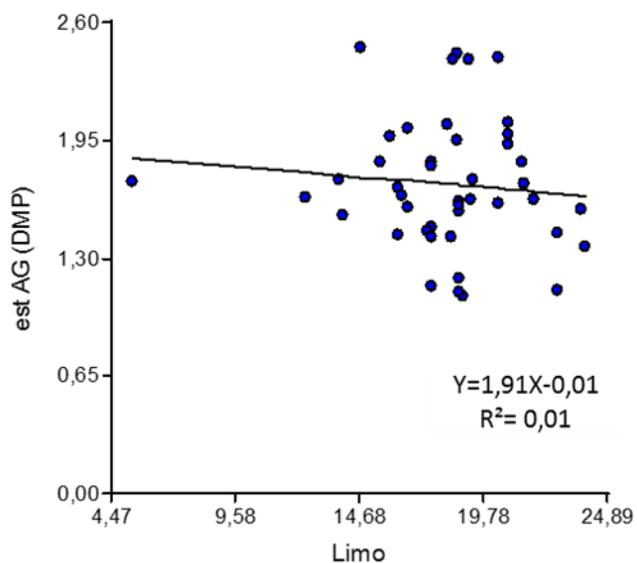


Figura 66: Coeficiente de Correlación  $R^2$  entre el DPM y el contenido de limo

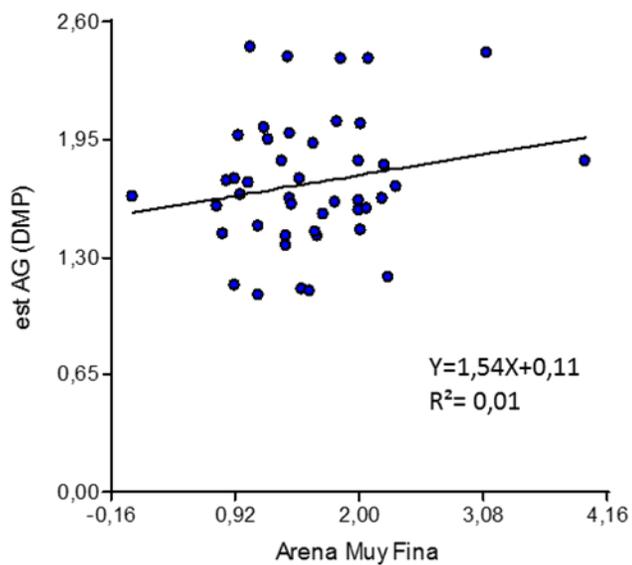
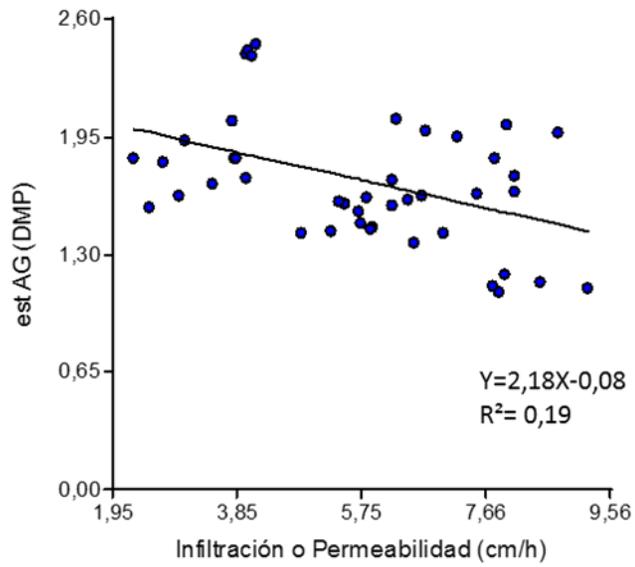
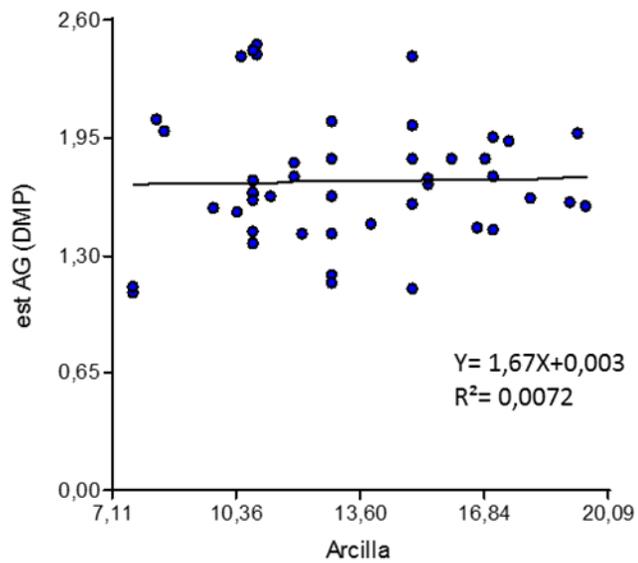


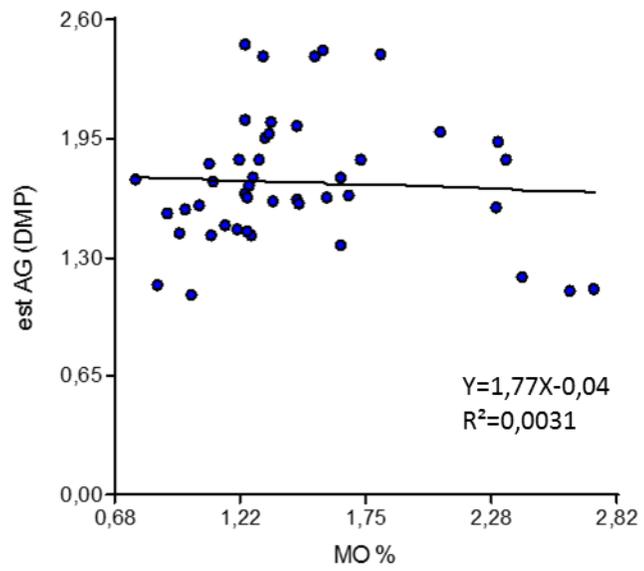
Figura 67: Coeficiente de Correlación  $R^2$  entre el DPM y el contenido de Arena Muy Fina



**Figura 68:** Coeficiente de Correlación  $R^2$  entre el DPM y la infiltración (cm/h)



**Figura 69:** Coeficiente de Correlación  $R^2$  entre el DPM y el contenido de



**Figura 70:** Coeficiente de Correlación  $R^2$  entre el DPM y el contenido de Materia Orgánica

## 9.7 ANEXO VII: ÍNDICE DE FERTILIDAD GLOBAL

**Tabla 12:** Medidas de resumen del Índice de Fertilidad Global, n=5, en los sitios evaluados en la cuenca del arroyo Santa María.

Series	usos	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Berón de Astrada	Bosque Nativo	14	2,24	16	11	17
	Forestación (Eucaliptus grandis)	12	1	8,33	11	13
	Mandioca	14	0,71	5,05	13	15
	Pastura (Brachiaria brizantha)	12,4	0,89	7,21	11	13
Chavarría	Bosque Nativo	13,8	1,64	11,9	12	16
	Ganadería Extensiva	9	0	0	9	9
	Pastura (Brachiaria brizantha)	10,2	2,17	21,3	8	13
Chequín	Arroz	10,6	0,55	5,17	10	11
	Ganadería Extensiva	9,8	1,3	13,3	8	11
Loreto	Forestación (Eucaliptus grandis)	9,6	0,55	5,71	9	10
	Ganadería Extensiva	10,2	0,84	8,2	9	11
	Maíz	11	0,71	6,43	10	12
	Pastura (Brachiaria brizantha)	10,4	0,89	8,6	10	12
Tataré	Arroz	10,8	1,79	16,6	10	14
	Forestación (Eucaliptus grandis)	14,2	1,48	10,5	12	16
	Ganadería Extensiva	10,4	0,89	8,6	9	11
Timbo Paso	Arroz	12	2,65	22,1	9	16
	Bosque Nativo	18	2,35	13	15	20
Torres	Arroz	12,4	1,95	15,7	11	15
	Ganadería Extensiva	12,4	0,89	7,21	11	13

\*D.V.: Desvío Estándar

\*C.V.: Coeficiente de Variación