

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA DE ACUÍFEROS GENERADA  
POR LAS PLANTACIONES DE *POLYLEPIS RACEMOSA* (QUINUAL)  
MEDIANTE EL BALANCE HÍDRICO DE SUELOS PROPUESTO POR  
SCHOSINSKY EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SHULLCAS, HUANCAYO –  
JUNÍN”**

**PRESENTADO POR:**

**CAMARENA VILLANUEVA CLAUDIA NARIOTH**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**HUANCAYO – PERÚ**

**2015**

## **DEDICATORIA**

A mi madre quien me brindó siempre su apoyo incondicional para lograr mis metas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco inmensamente a CARE, especialmente al Ingeniero Odón Zelarayán representante de CARE – HUANCAYO y a la ingeniero Jackeline Chacaltana por el apoyo logístico, técnico y el financiamiento brindado para materializar esta investigación, pero ante todo por concederme la oportunidad de formar parte y compartir con un grupo humano tan admirable como el que labora en dicha organización.

De igual manera hago llegar mi agradecimiento de forma infinita a mi asesor, por haber depositado su confianza en mí y guiarme de forma constante durante la realización de este trabajo.

Y en general hago extensiva mi gratitud a todas aquellas personas que colaboraron y me brindaron un apoyo incondicional en la realización de esta investigación.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	iv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
RESUMEN .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	xx
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
1.1 Caracterización de la Realidad Problemática.....	24
1.2 Formulación del Problema .....	37
1.2.1 Problema General.....	37
1.2.2 Problemas Específicos.....	38
1.3 Objetivos de la Investigación .....	38
1.3.1 Objetivo General .....	38
1.3.2 Objetivos Específicos.....	38
1.4 Justificación e Importancia.....	39
1.5 Importancia.....	40
1.6 Limitaciones.....	41
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	42
2.1 Marco Referencial.....	42
2.1.1 Antecedentes de la Investigación.....	42
2.1.2 Referencias Históricas .....	43
2.2 Marco Legal.....	48
2.3 Marco Conceptual.....	50

2.4 Marco Teórico.....	53
2.4.1 Fisiografía de Los Andes.....	53
2.4.1.1 Geomorfología.....	53
A. Estructuras predominantes .....	53
a) Macizos deformados .....	53
b) Cuencas deformadas del precámbrico: .....	53
c) Cordilleras andinas.....	53
B. Proceso de formación de Los Andes .....	53
a) Teorías.....	54
C. Segmentación de Los Andes .....	55
a) Andes del Norte.....	55
b) Andes Centrales.....	56
c) Andes del Sur .....	58
2.4.1.2 Suelo .....	58
A. Factores de Formación .....	58
a) Clima.....	59
b) Organismos.....	59
c) Relieve .....	59
d) Material Parental .....	60
e) Tiempo .....	60
B. Procesos.....	60
a) Meteorización Física.....	60
b) Meteorización Química.....	60
c) Meteorización Biológica.....	61
2.4.1.3 Clima .....	61
A. Clima de Los Andes Centrales.....	61
B. Elementos Climáticos .....	62
a) Radiación Solar:.....	62
b) Temperatura del aire: .....	62
c) Presión Atmosférica.....	62
d) Humedad Atmosférica .....	63
e) Viento.....	63
2.1.1.4 Hidrología .....	63

A. Cuenca Hidrográfica .....	63
B. Índices y Parámetros Morfométricos.....	63
a) Longitud del Cauce Principal .....	63
b) Elevación Media de la Cuenca .....	64
c) Área.....	64
d) Desnivel Altitudinal .....	65
e) Coeficiente de Forma (Kf) .....	65
f) Coeficiente de Compacidad (Kc) .....	65
g) Índice de Alargamiento (Ia).....	66
h) Coeficiente de Masividad (Km).....	67
i) Orden de Corriente.....	67
j) Densidad de Drenaje (Dd) .....	68
k) Número de Escurrimientos .....	68
l) Pendiente del Cauce Principal.....	69
2.4.1.5 Ecosistemas .....	69
A. Ecosistemas de Alta Montaña.....	69
a) Ecología de Los Andes Centrales.....	70
2.4.2. CICLO HIDROLÓGICO.....	74
2.4.2.1 Procesos Hidrológicos en la Napa Freática .....	75
2.4.3. ACUÍFEROS .....	76
2.4.3.1 Parámetros .....	77
2.4.3.2 Tipos de Acuíferos .....	79
A. Según la Capa Permeable.....	79
B. De acuerdo a la Movilidad del Agua.....	80
C. Por la Textura.....	80
2.4.4. RECARGA HÍDRICA.....	81
2.4.4.1 Fuentes de Recarga .....	81
A. Recarga Directa.....	82
B. Recarga Indirecta .....	82
C. Métodos para Estimar la Recarga.....	82
2.4.4.2 Factores que Determinan la Recarga .....	92
A. Clima .....	92

a) Precipitación .....	92
b) Evapotranspiración .....	100
B. Suelo .....	106
a) Propiedades .....	106
C. Relieve .....	114
D. Estratigrafía Geológica .....	114
a) Influencia de la estratigrafía y la estructura en la composición de acuíferos .....	115
b) Prevalencia de rocas que determinan la presencia de acuíferos .....	116
E. Cobertura Vegetal.....	116
a) Profundidad Radicular .....	117
b) Intercepción .....	118
F. Escorrentía .....	119
a) Tipos de escorrentía .....	119
b) Factores que afectan la escorrentía.....	120
 CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	 122
3.1 Metodología .....	122
3.1.1 Método de la Investigación.....	122
3.1.2 Tipo de la Investigación.....	129
3.1.3 Nivel de la Investigación.....	129
3.2 Diseño de la Investigación .....	130
3.3 Hipótesis de la Investigación.....	130
3.3.1 Hipótesis General.....	130
3.3.2 Hipótesis Específicas .....	130
3.4 Variables.....	130
3.4.1 Variable Independiente .....	130
3.4.2 Variables Dependientes .....	130
3.5 Cobertura de Estudio .....	131
3.5.1 Universo.....	131
3.5.2 Población .....	131
3.5.3 Muestra .....	131
3.5.4 Muestreo.....	131

3.6 Técnicas e Instrumentos .....	131
3.6.1 Técnicas de la Investigación .....	131
3.6.2 Instrumentos de la Investigación .....	131
3.7 Procesamiento Estadístico de la Información.....	132
3.7.1 Estadísticas.....	132
3.7.2 Representación.....	133
3.7.1 Técnica de la Comprobación de la Hipótesis.....	133
 CAPÍTULO IV: ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ...	134
4.1 Resultados.....	134
4.1.1 Resultados de la caracterización de las zonas de estudio.....	134
4.1.2 Resultados de la caracterización del perfil del suelo .....	138
4.1.3 Cálculo de la Fracción de lluvia interceptada por el Follaje (Ret) .....	141
4.1.4 Cálculo de la Infiltración básica .....	142
4.1.5 Determinación del Coeficiente de Infiltración del suelo (Ci).....	144
4.1.6 Cálculo de la Precipitación Efectiva ( $P_{ef}$ ).....	146
4.1.7 Cálculo de la Evapotranspiración de Cultivo ( $ET_{cultivo}$ ) y evapotranspiración real (ETR) .....	147
4.1.8 Determinación de la Humedad Inicial del suelo (HSi) y Humedad del suelo al final del mes (HSf) .....	152
4.1.9 Cálculo de la Escorrentía (ESC).....	154
4.1.10 Cálculo de la Recarga Potencial de acuíferos (RP).....	156
4.1.11 Variación de la Recarga por Zona de Estudio .....	160
4.1.12 Variación de Recarga por Época del año .....	161
4.1.13 Grado de correlación entre la Recarga hídrica y el Número de Plantaciones presentes en cada Zona de Estudio.....	162
4.1.14 Comportamiento de la Precipitación Efectiva vs Incremento Caudal de los manantiales .....	163
4.1.15 Recarga Hídrica vs Caudal de Manantiales.....	163
4.1.17 Comportamiento del Caudal Medio con relación a la Precipitación .....	164
 4.2 Discusión de Resultados .....	165
 4.3 Contrastación de Hipótesis .....	169
 CONCLUSIONES.....	170
RECOMENDACIONES.....	171
BIBLIOGRÁFIA.....	172
LINCOGRÁFIA.....	181
ANEXOS.....	182

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANA	Autoridad Nacional del Agua.
ALA	Autoridad Local del Agua.
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
IGRAC	Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas.
INRENA	Instituto de Recursos Naturales.
IPCC	Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.
IUFRO	Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal.
MA	Millones de años.
MINAM	Ministerio del Ambiente.
Mmm <sup>3</sup>	Miles de metros cúbicos.
MMm <sup>3</sup>	Millones de metros cúbicos.
OMM	Organización Mundial de Meteorología.
PBI	Producto Bruto Interno.
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

PRAA	Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales.
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SERFOR	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre
UNEP	Programa Ambiental de las Naciones Unidas.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA N°1:</i> Proyecciones del Calentamiento Global.....	25
<i>FIGURA N°2:</i> Mapa de recursos de Agua Subterránea en el mundo.....	27
<i>FIGURA N°3:</i> Mapa de porcentajes de agua subterráneas para proporcionar el suministro de agua .....	32
<i>FIGURA N°4:</i> Tendencia de la cobertura glaciaria del Nevado Huaytapallana.....	35
<i>FIGURA N°5:</i> Distribución de Placas Tectónicas.....	54
<i>FIGURA N°6:</i> Distribución de Bosques de Montaña en el Mundo al año 2000....	70
<i>FIGURA N°7:</i> Distribución del Género <i>Polylepis</i> en el Perú.....	74
<i>FIGURA N°8:</i> Esquema del Ciclo Hidrológico.....	75
<i>FIGURA N°9:</i> Regiones de aguas subterráneas del mundo: Modo predominante en presencia de agua .....	82
<i>FIGURA N°10:</i> Polígonos de Thiessen de un área de seis Estaciones pluviométricas.....	94
<i>FIGURA N°11:</i> Triángulo de texturas que muestra los límites de arena, limo y arcilla.....	108
<i>FIGURA N°12:</i> Variaciones de la capacidad máxima de retención de agua para diferentes tipos de suelo.....	111
<i>FIGURA N°13:</i> Extracción de agua por planta y su relación con el porcentaje de profundidad de raíces.....	117
<i>FIGURA N°14:</i> Codificación utilizada para inventariar las plantaciones.....	124
<i>FIGURA N°15:</i> Velocidad de infiltración en la Zona Testigo (ZT).....	143
<i>FIGURA N°16:</i> Velocidad de infiltración en la Zona de Estudio N°1 (ZE - 1).....	143

<i>FIGURA N°17:</i> Velocidad de infiltración en la Zona de Estudio N°2 (ZE - 2).....	144
<i>FIGURA N°18:</i> Variación entre ETo y ETR en la ZT.....	148
<i>FIGURA N°19:</i> Variación entre ETc y ETR en la de Estudio N°1 (ZE – 1).....	150
<i>FIGURA N°20:</i> Variación entre ETc y ETR en la de Estudio N°1 (ZE – 2).....	151
<i>FIGURA N°21:</i> Pérdidas mensuales por escorrentía en la ZT.....	154
<i>FIGURA N°22:</i> Pérdidas mensuales por escorrentía en la Zona de Estudio N°1 (ZE - 1).....	155
<i>FIGURA N°23:</i> Pérdidas mensuales por escorrentía en la Zona de Estudio N°2 (ZE - 2).....	153
<i>FIGURA N°24:</i> Precipitación Vs Recarga potencial de acuíferos en la ZT.....	157
<i>FIGURA N°25:</i> Precipitación Vs Recarga potencial de acuíferos en la Zona de Estudio N°1 (ZE - 1).....	158
<i>FIGURA N°26:</i> Precipitación Vs Recarga potencial de acuíferos en la Zona de Estudio N°2 (ZE - 2).....	159
<i>FIGURA N°27:</i> Variación de la recarga hídrica potencial en las tres zonas de estudio en un año.....	160
<i>FIGURA N°28:</i> Aporte volumétrico de recarga hídrica por zonas de estudio.....	160
<i>FIGURA N°29:</i> Variación de la recarga hídrica potencial en las tres zonas de estudio en función a la época .....	161
<i>FIGURA N°30:</i> Aporte volumétrico de recarga hídrica por época.....	161
<i>FIGURA N°31:</i> Grado de Correlación presente entre las plantaciones de <i>Polylepis racemosa</i> y la recarga hídrica de acuíferos presentes en la Subcuenca del rio Shullcas.....	162

<i>FIGURA N°32: Comportamiento del Caudal de Manantiales presentes en la Subcuenca en función a la Precipitación Efectiva.....</i>	<i>163</i>
<i>FIGURA N°33: Relación existente entre la Recarga Hídrica y el Caudal de Manantiales.....</i>	<i>163</i>
<i>FIGURA N°34: Relación entre la Precipitación Efectiva y el Caudal Medio en la Subcuenca del Rio Shullcas.....</i>	<i>164</i>
<i>FIGURA N°35: Determinación de la relación entre la Precipitación Efectiva y la Recarga Hídrica.....</i>	<i>166</i>
<i>FIGURA N°36: Determinación de la relación entre la Evapotranspiración Real y la Recarga Hídrica .....</i>	<i>167</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N°1: Incremento neto de la población en América Latina afectada por Estrés Hídrico.....	30
TABLA N°2: Demanda Hídrica Subterránea total agrario y no agrario en la Subcuenca del Rio Shullcas.....	36
TABLA N°3: Clases de Compacidad.....	66
TABLA N°4: Clases de Alargamiento.....	67
TABLA N°5: Clases de Masividad.....	67
TABLA N°6: Clases de Orden.....	68
TABLA N°7: Clases de Densidad.....	68
TABLA N°8: Temperatura mínima de resistencia, lesiones y de congelación durante época seca y húmeda.....	72
TABLA N°9: Endemismo de las especies del género <i>Polylepis</i> .....	73
TABLA N°10: Estimación del Balance de agua en el Mundo.....	76
TABLA N°11: Valores de Coeficiente de Retención de Follaje.....	85
TABLA N°12: Componentes del Coeficiente de Infiltración por efecto de la Pendiente.....	86
TABLA N°13: Componentes del Coeficiente de Infiltración por efecto de la Cobertura Vegetal.....	86
TABLA N°14: Valores de velocidad de infiltración del agua según la textura del suelo.....	97
TABLA N°15: Georeferenciación de Zonas de Estudio.....	122
TABLA N° 16: Datos geográficos de las Estaciones Meteorológicas.....	125

<i>TABLA N°17: Resultados del cálculo de pendiente en la Zona Testigo (ZT).....</i>	<i>135</i>
<i>TABLA N°18: Resultados del cálculo de pendiente en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>136</i>
<i>TABLA N°19: Inventario y características de especies presentes en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>136</i>
<i>TABLA N°20: Resultados del cálculo de pendiente en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>137</i>
<i>TABLA N°21: Inventario y características de especies presentes en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>137</i>
<i>TABLA N°22: Propiedades de suelo de la Zona Testigo (ZT).....</i>	<i>138</i>
<i>TABLA N°23: Horizontes del perfil de suelo de la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>138</i>
<i>TABLA N°24: Resultados de granulometría de la muestra de la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>139</i>
<i>TABLA N°25: Propiedades de suelo de la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>139</i>
<i>TABLA N°26: Horizontes del perfil de suelo de la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>139</i>
<i>TABLA N°27: Resultados de granulometría de la muestra de la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>140</i>
<i>TABLA N°28: Propiedades de suelo de la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>140</i>
<i>TABLA N°29: Cálculo de retención para la Zona Testigo (ZT).....</i>	<i>141</i>
<i>TABLA N°30: Cálculo de retención para la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>141</i>
<i>TABLA N°31: Cálculo de retención para la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>142</i>

TABLA N°32: Cálculo del Coeficiente de Infiltración en la Zona Testigo (ZT).....	144
TABLA N°33: Cálculo del Coeficiente de Infiltración en la (ZE – N°1).....	145
TABLA N°34: Cálculo del Coeficiente de Infiltración en la (ZE – N°2).....	145
TABLA N°35: Cálculo de la precipitación efectiva en la Zona Testigo (ZT).....	146
TABLA N°36: Cálculo de la precipitación efectiva en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....	146
TABLA N°37: Cálculo de la precipitación efectiva en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....	147
TABLA N°38: Cálculo de la evapotranspiración de referencia y ETR en la Zona Testigo (ZT).....	148
TABLA N°39: Cálculo de la evapotranspiración de cultivo y ETR en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....	149
TABLA N°40: Cálculo de la evapotranspiración de cultivo y ETR en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....	150
TABLA N°41: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la (ZT).....	152
TABLA N°42: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la Zona de Estudio N°1.....	152
TABLA N°43: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la Zona de Estudio N°2.....	153
TABLA N°44: Cálculo de la escorrentía en la Zona Testigo (ZT).....	154
TABLA N°45: Cálculo de la escorrentía en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....	155
TABLA N°46: Cálculo de la escorrentía en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....	156
TABLA N°47: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos en la Zona Testigo (ZT).....	157
TABLA N°48: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....	158

<i>TABLA N°52: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>159</i>
<i>TABLA N°53: Cálculo de la infiltración básica en la Zona Testigo (ZT).....</i>	<i>194</i>
<i>TABLA N°54: Cálculo de la infiltración básica en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1).....</i>	<i>194</i>
<i>TABLA N°55: Cálculo de la infiltración básica en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2).....</i>	<i>195</i>

## RESUMEN

La investigación tuvo por objetivo Determinar la influencia de las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) en la recarga hídrica de acuíferos estimada mediante el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky en la subcuenca del río Shullcas. Acorde a la naturaleza del estudio, reúne las condiciones para ser nominada como una investigación de tipo Aplicada, de nivel Correlacional y llevada a cabo mediante un diseño No experimental por Bloques completamente al azar Se evaluó para ello tres zonas; ZT, ZE-1 y ZE-2 (zona con escasa cobertura vegetal y bosques de *Polylepis* de 5 y 10 años respectivamente), usando como método base el Balance Hídrico de Suelos propuesto por Schosinsky, el cual consiste en calcular la recarga hídrica mediante la determinación de la precipitación, humedad inicial, evapotranspiración, escorrentía y humedad final. Según los resultados obtenidos se estableció una relación lineal entre la recarga potencial de acuíferos y la cantidad de precipitación efectiva en la subcuenca del río Shullcas, no se logró establecer una relación lineal entre la recarga potencial de acuíferos y la evapotranspiración real generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) debido a que no se presentó un ajuste significativo en el modelo lineal. Finalmente, se estableció una relación inversa entre la recarga potencial de acuíferos y la escorrentía presente en la subcuenca del río Shullcas, concluyendo en que las plantaciones de *Polylepis racemosa* influyen significativamente y se correlacionan directamente con el proceso de recarga, mediante la siguiente ecuación  $y = 5,6336x - 146,88$ .

**Palabras clave:** Acuíferos, Cambio climático, Cuenca del Shullcas, *Polylepis racemosa*, Recarga hídrica, Aguas Subterráneas

## ABSTRACT

The research aimed to determine the influence of plantations *Polylepis racemosa* (Quinual) in water recharge estimated using soil water balance proposed by Schosinsky in the basin of the river Shullcas. According to the nature of the study, eligible to be nominated as a type Applied research, correlational level and carried out by an experimental design not by randomized block was evaluated for it three zones; ZT, ZE-1 and EA-2 (zone with little vegetation cover and forests of *Polylepis* of 5 and 10 years respectively), using as a basis the method Soil Water Balance Schosinsky proposed, which is to calculate the water recharge by determination of precipitation, initial moisture, evapotranspiration, runoff and final moisture. According to the results a linear relationship between the recharge potential for aquifers and the amount of effective rainfall in the basin of Shullcas River was established, it was not possible to establish a linear relationship between potential groundwater recharge and evapotranspiration generated by plantations *Polylepis racemosa* (Quinual) because a significant adjustment is presented in the linear model. Finally, an inverse relationship between potential aquifer recharge and runoff in the basin of this river Shullcas, concluding that *Polylepis racemosa* plantations significantly influence and correlate directly with the recharging process by the following equation  $y = 5,6336x - 146.88$ .

**Key words:** Aquifers, climate change, Shullcas river basin, Quinual (*Polylepis racemosa*), water recharge, groundwater.

## INTRODUCCIÓN

Adaptarse a los impactos del cambio climático es uno de los mayores retos de la humanidad. La percepción del cambio climático como un problema ambiental predominante en la actualidad se ha ido reforzando en los últimos años gracias a los diversos estudios que aportan evidencia sobre los impactos de este fenómeno en una gran gama de recursos siendo el agua uno de los bienes más vulnerables. En América Latina la oferta hídrica está abastecida principalmente por la existencia de los glaciares tropicales los cuales han reflejado en los últimos decenios un acelerado retroceso y una pérdida exponencial de cobertura glaciar como consecuencia del incremento de los patrones de temperatura, derivando así en el padecimiento de un mayor estrés hídrico en las cuencas hidrográficas, y consecuentemente en la sobreexplotación de las reservas subterráneas de agua ya que después de los sistemas glaciares el subsuelo contiene la mayor cantidad de agua dulce disponible en el planeta.

Nuestro país no es ajeno a esta problemática ya que es altamente vulnerable al cambio climático y con estimaciones de sufrir déficit hídrico al 2030, no obstante este problema se ve acrecentado aún más por la intensa deforestación de bosques, lo cual genera que disminuya significativamente el nivel de recarga de los acuíferos e incremente la escasez del líquido elemento que padecería el Perú, país que es catalogado como uno de los más dependientes a usar aguas subterráneas para abastecer la demanda poblacional.

En nuestra región el suministro de agua recae en el Nevado del Huaytapallana y los acuíferos presentes en la Subcuenca del río Shullcas; mismos que compensan el déficit actual y constituyen una fuente esencial del recurso hídrico. Es en este contexto que surge la necesidad de realizar una investigación que permita determinar estrategias capaces de garantizar una disponibilidad y calidad hídrica para hacer frente al estrés que se exacerbaría en la cuenca, garantizando con ello

que se dote adecuadamente a la población del líquido elemento y otros usos como los requeridos por el sector agricultura.

Por ende, la investigación se justifica en la necesidad de generar información fehaciente sobre la influencia de una especie nativa como es el *Polylepis racemosa* (Quinual) en la recarga de acuíferos. Este conocimiento resulta vital, teniendo en cuenta que actualmente la cuenca presenta un estrés hídrico, el cual se puede agravar si las reservas subterráneas de agua no se recargan lo suficiente como para compensar el déficit de abastecimiento de aguas superficiales.

Asimismo, es importante señalar que pese a que hay diversos estudios que se enmarcan en la problemática presente en la subcuenca del río Shullcas, ésta investigación es pionera en su categoría por lo que los resultados obtenidos llegan a ser de interés en el contexto científico pues se promueve la investigación concerniente a la gestión de recursos hídricos, contemplado en las Líneas de Investigación Prioritarias de la Agenda de Investigación Ambiental propuesto por el MINAM.

La investigación se realizó en base al Método de Balance Hídrico de Suelos propuesto por Schosinsky y fue desarrollado de la siguiente manera;

El Capítulo I, consistió en construir el planteamiento de la realidad problemática que representa el cambio climático y su impacto en los recursos hídricos tanto superficial y subterráneo y cuáles serían las medidas de adaptación ante estos sucesos. Asimismo se determinó de manera exitosa los objetivos de la investigación, hipótesis, justificación, importancia y limitaciones con el fin de encaminar el proyecto hacia la siguiente fase.

En el Capítulo II se recopiló antecedentes relacionados a la investigación con la finalidad de definir pautas y criterios en base a experiencias anteriores sobre el éxito de los resultados obtenidos, deficiencias de la investigación y las recomendaciones a tener en cuenta. Asimismo en este capítulo se desarrollaron las Bases Teóricas

en la cual se fundamenta de manera objetiva todo el sustento teórico, metodológico e instrumental para llevar a cabo la investigación contemplando desde las leyes que rigen el ciclo hidrológico hasta el funcionamiento de un acuífero, así como los factores que determinan y hacen posible el proceso de recarga hídrica.

En el Capítulo III se determinó la metodología a desarrollar eligiendo como método base el Método de Balance Hídrico de Suelos propuesta por Schosinsky (2006) ya que esta es muy fiable y abarca la totalidad de factores que intervienen en el proceso de recarga hídrica, siendo ampliamente usada en países de centro américa, Chile y España. De igual manera se determinó la población y muestra que se estudiaría, así como el diseño a emplear eligiendo un método No Experimental y un muestreo por Bloques completamente aleatorio para la elección de una zona en la que haya gran predominancia de plantaciones de *Polylepis*.

El Capítulo IV consistió en la presentación de resultados teniendo como base el análisis y procesamiento de datos e información recabada; esta información tuvo como fuente los datos meteorológicos de las dos estaciones del SENAMHI que se encuentran en la cuenca del río Shullcas, datos obtenidos en los trabajos de campo (Infiltración, Caracterización de la zona de estudio) y resultados derivados de las muestras evaluadas en laboratorios (Granulometría, Capacidad de campo, Punto de Marchitez Permanente). Además de ello se realizó la discusión de los resultados obtenidos contrastándolos con resultados de investigaciones preliminares.

Finalmente se dieron a conocer las conclusiones a las cuales se llegó después de discutir los resultados obtenidos y pese a que la principal limitación en el desarrollo de la investigación fue lidiar con la escasa información sobre la especie en estudio, se determinó que las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) se correlacionan de manera positiva con la recarga hídrica de acuíferos que se encuentran presentes en la subcuenca del río Shullcas, considerando exitoso el proceso de reforestación llevada a cabo en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), el cual constituye una valiosa estrategia de adaptación frente al impacto que desde ya

viene causando el cambio climático en la principal fuente de abastecimiento de agua como es el nevado del Huaytapallana. De esta manera se evitaría los conflictos y enfrentamientos que surgen por la merma de fuentes y recursos hídricos con el sector agricultura ya que esta estrategia estaría asegurando la calidad y disponibilidad del recurso hídrico para el abastecimiento del líquido elemento.

# CAPÍTULO I

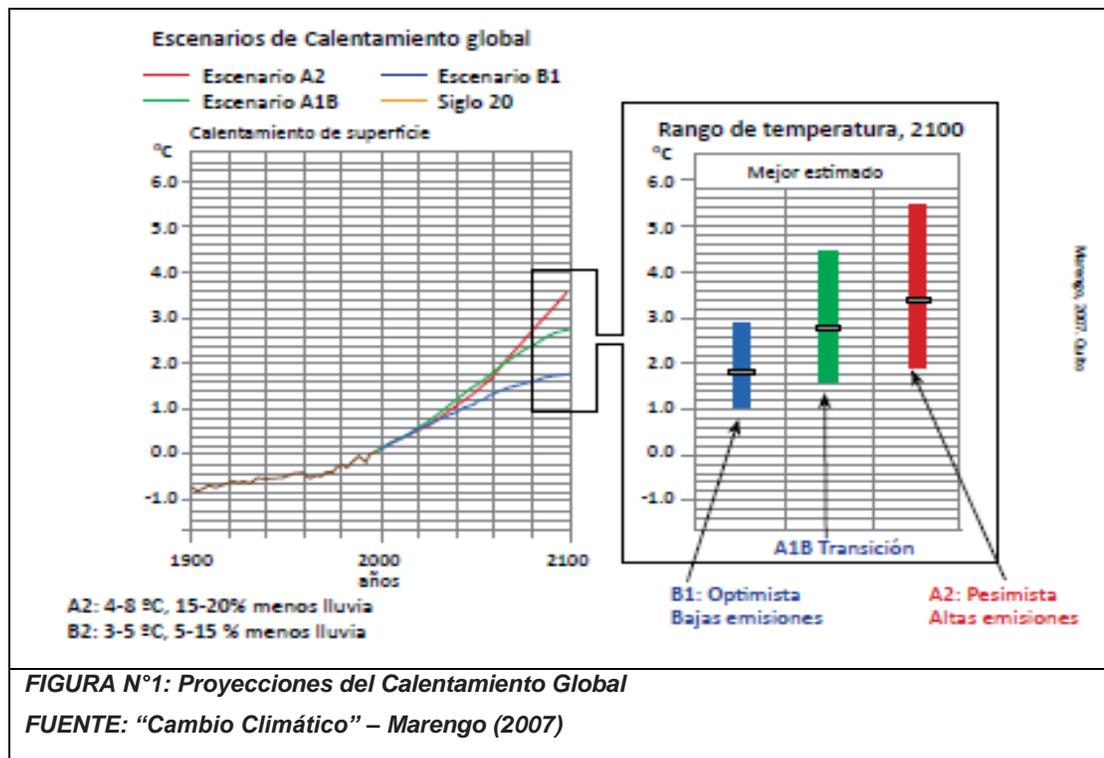
## PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

### 1.1 Caracterización de la Realidad Problemática

¿El cambio climático representa una amenaza para agudizar la escasez del líquido elemento? Esta es tal vez una de las interrogantes que generan mayor preocupación, ya que abundantes estudios aportan evidencia sobre los efectos adversos del cambio climático en la disponibilidad hídrica del planeta. Y pese a que nuestro país goza de una importante riqueza del líquido elemento no es ajeno a este problema, pues los sistemas glaciares y las reservas subterráneas de agua a la actualidad ya empiezan a presentar una escasez. En el Valle del Mantaro la sostenibilidad hídrica depende del Nevado del Huaytapallana e importantes acuíferos que son explotados para cubrir la demanda poblacional, agrícola, industrial y energética, sin embargo debido a las repercusiones climáticas y la intensa deforestación, la inminente crisis hídrica se podría exacerbar en la cuenca.

La percepción del cambio climático como uno de los problemas ambientales predominantes en la actualidad, se ha ido reforzando en todo el mundo, y de forma especial gracias a la difusión de diversas investigaciones realizadas.

Una de las más destacadas ha sido la contribución del Cuarto Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) donde concluye; que si las tendencias actuales se mantienen, será inevitable el incremento de la temperatura de la Tierra entre 1,4 °C y 5,8 °C al 2100 y en consecuencia la generación de eventos extremos como tormentas tropicales y sequías, daños significativos e irreversibles en ecosistemas de todo tipo (como arrecifes de coral y zonas polares), además del riesgo de extinción de especies de flora y fauna vulnerables a estos drásticos eventos.



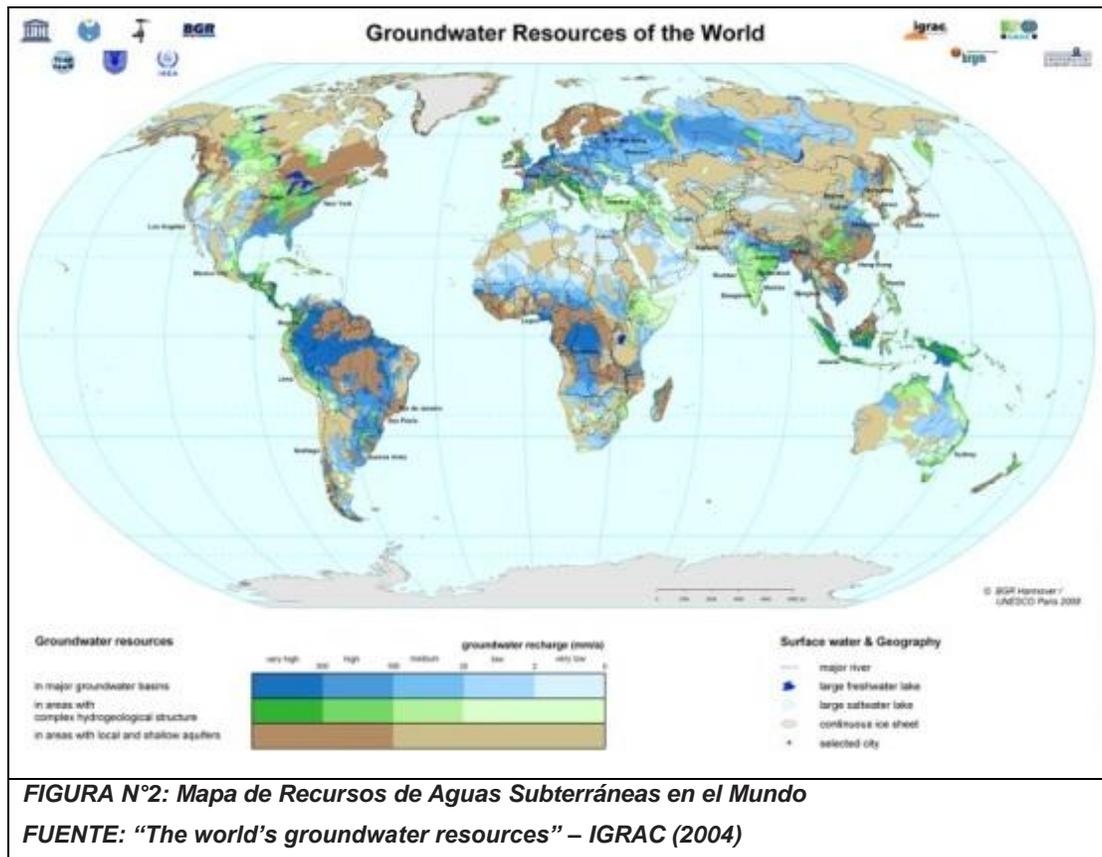
Es evidente que los efectos del cambio climático afectan los diversos sistemas, alterando así a una gran gama de recursos esenciales para la existencia de vida en el planeta, en tal sentido es innegable que uno de los bienes más vulnerables y sustanciales es el agua. Se espera que el cambio climático intensifique el estrés padecido actualmente por los recursos hídricos ya que los registros de observaciones y las proyecciones climáticas aportan

abundante evidencia de que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático, con muy diversas repercusiones para las sociedades y los ecosistemas. En consecuencia la publicación del IPCC del 2008 sobre “Agua y Cambio Climático” indica que de aquí al 2050, la extensión de terreno que padecerá un estrés hídrico más acentuado por efecto del cambio climático llegará a ser el doble de la que padece un estrés hídrico menor.

Las proyecciones también estiman; que las reservas de agua almacenadas en los glaciares y en la capa de nieve que constituyen el 75 % de agua dulce del planeta disminuirán durante este siglo, reduciendo así la disponibilidad de agua; afectando en gran medida a regiones dependientes del deshielo en las principales cordilleras montañosas, en las que vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial. Ocasionando la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, los cuales desempeñan un papel insustituible en el almacenamiento y abastecimiento de agua ya que después de los casquetes polares el subsuelo contiene la mayor reserva de agua dulce del planeta, misma que en gran parte no es renovable y la cual compensa el déficit de abastecimiento de aguas superficiales. El Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC) estima que cerca del 60 % del agua extraída se destina a usos agrícolas en climas áridos y semiáridos y que los sistemas de agua subterráneas suponen entre un 25 % y 40 % del agua potable del mundo.

Si bien los estudios sobre el impacto de este fenómeno sobre los recursos freáticos renovables son pocos se sabe que los acuíferos son potencialmente vulnerables, viéndose afectada la rapidez de recarga de las aguas subterráneas, calidad y disponibilidad. Calculándose que tanto el noreste de Brasil, suroeste de África y la franja meridional del Mar Mediterráneo experimentarán una disminución del 70 % de la recarga de agua subterránea

hasta el decenio del 2050, constituyendo un peligro para los humedales que dependen de acuíferos y la escorrentía fluvial según lo concluido por el IPCC en su artículo “Agua y Cambio Climático”.



**FIGURA N°2: Mapa de Recursos de Aguas Subterráneas en el Mundo**

**FUENTE: “The world’s groundwater resources” – IGRAC (2004)**

A ello se suma el estudio realizado en el 2010 por las Naciones Unidas sobre los efectos del cambio climático en los sistemas hídricos, en donde se menciona que en las mejores circunstancias posibles para el 2020 habría 12 millones de personas en peligro de sufrir hambre por problemas asociados a sequías y a pérdidas de reservas de agua de los acuíferos, pero si se siguen perdiendo las reservas de los glaciares habría 300 millones más de personas con hambre en el mundo por problemas asociados a déficit de agua. Pero las verdaderas repercusiones se dejarán sentir en las zonas donde el sistema hídrico depende exclusivamente de las precipitaciones pluviales, lo cual dificultará la recarga de acuíferos agudizando la escasez de agua.

Los escenarios proyectados sobre los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe no son alentadores. En el 2009 la Comisión Europea presentó su informe sobre el “Cambio Climático en América Latina”, como resultado de la Cumbre UE – LAC celebrada en el 2008, en la cual se evidencia que durante las últimas décadas estas regiones ya fueron experimentando los impactos del cambio climático; como las importantes pérdidas de diversidad biológica con la extinción de muchas especies, el aumento de temperatura y la correspondiente disminución de humedad del suelo, intensificación de eventos extremos; inundaciones, sequías y tormentas, cambios de los patrones de precipitación y retroceso acelerado de glaciares que disminuirán notablemente la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico poniendo en riesgo con ello la seguridad alimentaria.

Las acentuadas variaciones climáticas en este continente han provocado que en años recientes América Latina y el Caribe se vean afectadas por eventos climáticos extremos altamente inusuales en la región que van desde la inundación en las pampas de Argentina (2000-2002), la sequía Amazónica (2005), aumentos de precipitación en Paraguay, Uruguay y las pampas de Argentina, a registrarse por el contrario; la disminución de precipitaciones en el sur de Chile, suroeste de Argentina, sur de Perú y el occidente de América Central.

América Latina es una de las regiones más ricas en agua, pues reúne el 65 % de los recursos de agua dulce del planeta, según los cálculos del Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP). Dado que no solo concentra el 95 % de los glaciares tropicales del mundo, de los cuales el 71 % de los mismos están ubicados en Perú, el 22 % en Bolivia, el 4 % en Ecuador y el 3 % en Colombia, sino que además ostenta en su territorio la tercera reserva de aguas subterráneas más grande del mundo con un volumen estimado de 30 000 a 40 000 km<sup>3</sup>. Según los expertos el Gran Acuífero de Guaraní ubicado en los

territorios de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay dispone de la cantidad necesaria del líquido elemento para abastecer a la población mundial durante 200 años, con una dotación promedio de 100 L/(hab.\*día).

A pesar de la riqueza hídrica de este continente, paradójicamente Latinoamérica es una de las regiones que presenta mayor crisis hídrica en el mundo, la cual se ha ido agravando en los últimos años a causa de los impactos del cambio climático y el vertiginoso incremento de la temperatura. Como consecuencia; se ha acelerado la tendencia de retroceso y desaparición de los glaciares con efectos críticos en la disponibilidad de agua en Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia siendo muy probable que en las próximas décadas éstos desaparezcan por completo, aumentando la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas de América Latina, las cuales actualmente ya están sometidas a estrés porque aportan menos de 1000 m<sup>3</sup>/(hab.\*año) estimando que al 2025 entre 37 y 66 millones de personas padecerían de disponibilidad de agua.

En relación a ello en las conclusiones del tercer congreso de la Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (IUFRO) celebrado en Junio del 2013 se menciona, que este problema se ve agravado aún más por las altas tasas de deforestación y degradación de bosques los cuales desempeñan un papel crucial en la protección y aprovechamiento del agua porque ayudan a mantener funciones primordiales del ciclo hidrológico. La importancia de los bosques como cuencas de captación de agua puede aumentar sustancialmente en los próximos decenios a medida que escaseen los recursos de agua dulce ya que son determinantes para favorecer y acrecentar la recarga de agua subterránea en acuíferos.

**TABLA N° 1: América Latina: Incremento neto de la población en América Latina afectada por Estrés Hídrico , 2025 y 2055 (en millones de personas)**

**FUENTE: Cambio Climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña**

ESCENARIO	1995	2025		2055	
		SIN CAMBIO CLIMÁTICO	CON CAMBIO CLIMÁTICO	SIN CAMBIO CLIMÁTICO	CON CAMBIO CLIMÁTICO
A1 HadCM3	22,2	35,7	21	54,0	60,0
A2 HadCM3	22,2	55,9	37 – 66	149,3	60,0 – 150,0
B1 HadCM3	22,2	35,7	22	54,0	74,0
B2 HadCM3	22,2	47,3	7 – 77	59,4	62,0

En este sentido es importante señalar que Sudamérica alberga el 21 % (860 millones de hectáreas aproximadamente) de los recursos forestales del mundo, de los cuales Brasil y Perú concentran el 92 % de bosques de la zona. Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) como resultados de la “Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010”, mencionan que en el periodo del 2000 – 2010 Sudamérica experimentó la mayor pérdida neta de los bosques alcanzando extensiones de 4 millones de hectáreas anuales, seguidas por África que sumó pérdidas de 3,4 millones de hectáreas al año.

A escala nacional Perú es uno de los diez países más vulnerables al cambio climático y considerado como el segundo en tener las variaciones climáticas de mayor intensidad en los Andes. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) nuestro país presenta cuatro de las cinco características de vulnerabilidad, manifestándose mediante cambios en los patrones de temperatura, modificaciones en los regímenes de lluvias y sequías, intensidad y frecuencia de vientos huracanados, entre otros eventos. Asimismo estudios realizados por el Ministerio del Ambiente (MINAM) arrojan como resultados que la superficie de los glaciares ha sufrido una pérdida del 22 % y que regiones como Junín, Huánuco, Piura entre otras ya presentan pérdidas económicas por fenómenos climáticos en los últimos años.

Como es de conocimiento, nuestro país cuenta con tres importantes cuencas hidrográficas indispensables para el abastecimiento del líquido elemento. El potencial del recurso hídrico en el Perú supone un volumen anual de 2 046 287 MMm<sup>3</sup>, provenientes de las reservas glaciares, ríos, lagos, humedales y acuíferos. Gracias a ello nuestra nación se posiciona entre los 20 países con mayor disponibilidad de agua, con un aporte per cápita de 72 510 m<sup>3</sup>/ (hab.\*año).

Sin embargo esta oferta hídrica de la que goza actualmente nuestro país está siendo gravemente aquejada por las variaciones climáticas, pues en los últimos años la alteración de estos sistemas ha ido repercutiendo en la provisión de agua para los principales usos consuntivos como; el uso humano, la agricultura, la industria y la generación de energía. Evidencia de ello es que en las últimas cuatro décadas se ha advertido un continuo retroceso atribuible al calentamiento global de los glaciares tropicales concentrados en Perú, agravando la crisis, ya que el volumen de agua superficial aportado por estos sistemas ha ido presentado una significativa reducción y una consecuente escasez que imposibilita una adecuada satisfacción de los requerimientos poblacional e industrial de ciudades como Huaraz, Chimbote, Trujillo y Lima.

Originado que el aporte de aguas superficiales sea insuficiente para satisfacer la demanda de las principales ciudades de la vertiente del Pacífico, que a la fecha concentran el 70 % del total de la población nacional, siendo necesaria la explotación de acuíferos presentes en esta zona para cubrir dicho déficit. Según el “Informe Nacional del Perú sobre Gestión de Recursos Hídricos” emitido en el año 2000, el volumen explotable anual de las reservas subterráneas es de 2 739,3 MMm<sup>3</sup>, del cual actualmente se aprovecha un volumen aproximado de 1 508 MMm<sup>3</sup> en esta vertiente.

De acuerdo a ello, la publicación “Las aguas subterráneas y su susceptibilidad a la degradación: Una evaluación global del problema y opciones para su gestión”, difundida por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), señala que Perú es catalogado como un país que requiere de un alto porcentaje de aguas subterráneas para proporcionar el suministro de agua potable. Asimismo sostiene que Lima es una de las ciudades más dependientes a este tipo de fuente, ya que dota de este recurso a los 8 500 842 habitantes (representan el 28,3 % de la población total del Perú) con un aproximado de 117 801 Mm<sup>3</sup>. Si a esto agregamos el informe de la Organización Mundial de Meteorología (OMM), que en su último reporte anual del 2010, manifiesta que Perú será uno de los países que tendrá déficit hídrica al 2030, la situación es más preocupante.



**FIGURA N°3: Mapa de porcentaje de aguas subterráneas para proporcionar el suministro de agua potable en América Latina y el Caribe**

**FUENTE: “Las aguas subterráneas y su susceptibilidad a la degradación: Una evaluación global del problema y opciones para su Gestión”**

No obstante la falta de articulación entre la agenda pública y la investigación se ve reflejada en la información registrada del volumen, calidad y fuentes de recursos hídricos, específicamente en lo referido a las reservas de aguas subterráneas, por ello resulta urgente fortalecer la investigación científica que permita conocer las necesidades públicas de investigación y los resultados de publicaciones científicas en tiempo real. Motivo por el cual el MINAM propone una “Agenda de Investigación Ambiental” en donde establece Líneas de Investigación Prioritarias para implementarse a corto plazo. En este contexto se atribuye especial importancia a la investigación en temas ambientales que debe desarrollarse con el fin de generar conocimiento para hacer frente a los desafíos que pongan en riesgo la integridad de los diversos ecosistemas y la gran gama de recursos presentes en nuestro país.

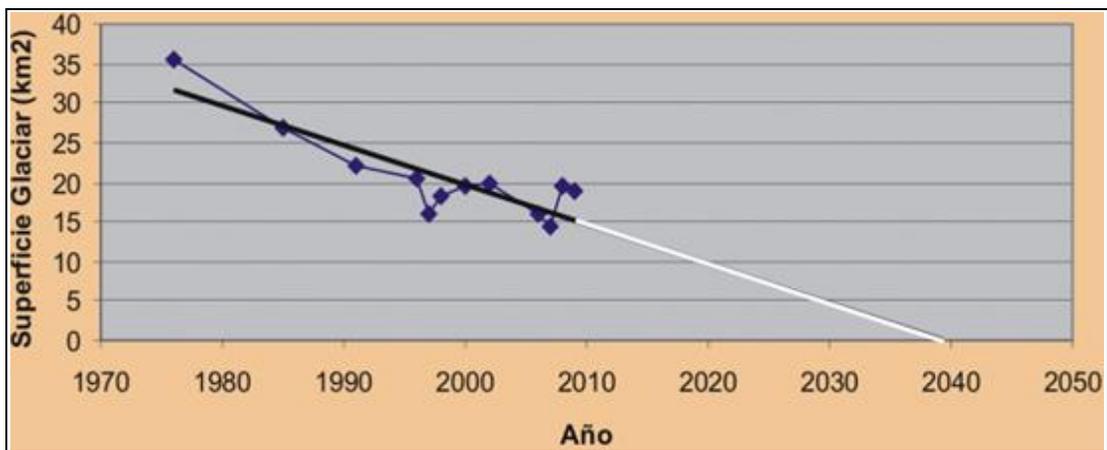
Como consecuencia se traza los lineamientos de investigación que plantean una evaluación y monitoreo de la disponibilidad, calidad, demanda y uso de los recursos hídricos, así como la evaluación del impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos, el desarrollo de tecnologías para la siembra y cosecha de agua, asimismo el impacto potencial del cambio climático sobre los sistemas agropecuarios y forestales. Estos lineamientos constituyen un precedente importante para el impulso de la generación de información a corto, mediano y largo plazo que permita conservar y gestionar el recurso hídrico. Asegurando de esta manera la difusión de datos que permita conocer a ciencia cierta el volumen de recursos hídricos subterráneos aprovechables y el posterior desarrollo de estrategias para incrementar la disponibilidad y poder asegurar una cobertura suficiente para la población de este líquido elemento frente a una inminente escasez. Asimismo es importante resaltar que en este sentido la Constitución del Perú a través de su Ley de Recursos Hídricos Nro. 29338 (Artículo 12º) tiene como objetivo promover la elaboración de estudios y la ejecución de proyectos y programas de investigación y capacitación en materia de gestión de recursos hídricos, los cuales han sido ignorados.

Debido a su ubicación geográfica, Junín es una región susceptible a los efectos potenciales del cambio climático. Estudios realizados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), concluyen que las precipitaciones están disminuyendo a un ritmo de 15 % por década y las temperaturas se encuentran aumentando a 0,74 °C en un lapso de tiempo promedio de 10 años, como consecuencia las consultas realizadas por CARE en el 2011 sobre el “Análisis de vulnerabilidad climática y la capacidad en la microcuenca hídrica del Shullcas” reflejan que las comunidades ya perciben los efectos extremos como sequías, heladas, inundaciones y deslizamientos de tierras. Por ende el Valle del Mantaro no está exento de estos efectos, muy por el contrario es una zona de atención prioritaria por la vulnerabilidad que conlleva las intensas variaciones climáticas en los ecosistemas, recursos y el desarrollo socioeconómico.

Un indicador altamente sensible y que reacciona de manera significativa frente a variaciones de la temperatura, precipitación y humedad es el Nevado del Huaytapallana. La observación más reciente sobre la desglaciación, realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), determinó que en 10 años el nevado del Huaytapallana perdió 5 299 259 m<sup>2</sup> de superficie de nieve, experimentando un índice de pérdida de masa glaciar anual del 10 %. Según dichas proyecciones resulta inminente que para inicios de la década del 2030 el Huaytapallana desaparezca amenazando la disponibilidad hídrica.

El nevado es considerado como una importante reserva del recurso hídrico y constituye un flujo constante de agua que alimenta el río Shullcas; principal fuente de abastecimiento de agua potable para 10 asentamientos a lo largo del río y para la ciudad de Huancayo, con una dotación promedio de 400 (L/s) además de servir para el regadío a casi 2 mil hectáreas en ambos márgenes del río Shullcas (INRENA 2007). En el III Foro Nacional “Agua para la Región Junín; estrés hídrico, amenaza global” llevado a cabo el 21 de Junio del 2013,

el Doctor Pablo Lagos, científico del IGP remarca que la sostenibilidad del agua en el Valle del Mantaro depende en gran medida del aporte hídrico proveniente del nevado así como de los manantiales presentes en la Subcuenca del Río Shullcas. Evidencia de ello es que el aporte volumétrico de las fuentes superficiales representa el 55 % y que a la actualidad las reservas subterráneas contribuyen con un volumen del 45 %, superior al 35 % que proveía, hasta antes del año 2004.



**FIGURA N°4: Tendencia de la Cobertura Glaciar del Nevado Huaytapallana**

**FUENTE: "Estudio por Teledetección de la dinámica glaciar en la Cordillera del Huaytapallana, Junín – Perú 2009"**

La afectación a dichas reservas subterráneas acrecentaría la escasez hídrica agravando seriamente la disponibilidad para el consumo humano, demanda de agua de riego y para la generación de energía. Esta problemática se ve extendida aún más por el pastoreo (principal ocupación económica de los pobladores locales) y la deforestación; actividades que aquejan la Subcuenca del río Shullcas, ya que para el año 2000 según el MINAM, se precisaba 734 272 72 Ha deforestadas en la región de las cuales cerca de 12 000 Ha se concentraban en la cuenca. Esto ha originado que se evidencie un proceso de degradación de las praderas de la subcuenca, pues la erradicación de especies nativas acrecienta la erosión de suelos y modifica funciones importantes como la regulación del ciclo hidrológico y la retención hídrica

generada por la presencia de la cobertura vegetal, inhibiendo la recarga de acuíferos subterráneos presentes en la zona.

Las reservas de aguas subterráneas no solo aportan un considerable volumen para abastecer el requerimiento de agua potable de la población, sino que además cubren la demanda de actividades agrícolas, piscícolas, industriales y energéticas. De los 135 manantiales inventariados en el marco de la consultoría “Determinación del uso del agua con fines agrarios y no agrarios en la parte alta, media y baja de la Subcuenca del Río Shullcas” - PRAA, se sabe cerca de 61 991 Mm<sup>3</sup> de agua son extraídos para ser empleados en actividades no agrarias. Por otra parte, sólo el uso del recurso hídrico destinadas para fines agrícolas representa el 18 % del volumen total extraído, dejando en evidencia la gran demanda de agua por este sector.

<b>TABLA N° 2: Demanda hídrica subterránea total agrario y no agrario en la Subcuenca del Río Shullcas</b>			
<b>FUENTE: “Determinación del uso del agua con fines agrarios y no agrarios en la parte alta, media y baja de la Subcuenca del Río Shullcas”, PRAA 2012”</b>			
CONDICIÓN	DEMANDA DE USO DE AGUA CON FINES		SUB TOTAL (Mmm <sup>3</sup> )
	AGRARIO (Mmm <sup>3</sup> )	NO AGRARIO (Mmm <sup>3</sup> )	
Formalizado	11 508,54	41 858	53 366,54
No Formalizado o Informal	2 166,08	20 133,66	22 299,74
<b>TOTAL</b>	<b>13 674,62</b>	<b>61 991,66</b>	<b>75 666,28</b>

Ante la exacerbación de esta crisis hídrica, por la merma de fuentes y recursos hídricos es inevitable que se origine conflictos respecto a la disponibilidad del agua, sobre todo con el sector agricultura en los meses de estiaje (Julio - Octubre) en donde el caudal disponible sólo fluctúa entre los 1,1 m<sup>3</sup>/s a 1,5 m<sup>3</sup>/s. Como es de entendimiento, la agricultura es la principal actividad económica en la región, contribuyendo al PBI regional con un aproximado de

390 millones de dólares en el 2011. Las percepciones tanto de los regantes de comunidades inmediatas como Acopalca, Paccha, Cullpa, Chamiseria y en general de la Junta de Regantes del Shullcas, manifiestan que la disponibilidad de agua de riego para distribuir en la época de estiaje es insuficiente, limitando el nivel de producción y calidad de las cosechas.

En este contexto es innegable la importancia que suponen las reservas hídricas subterráneas en la Subcuenca del Rio Shullcas, ya que ante el retroceso acelerado del Huaytapallana, las fuentes inmediatas a ser explotadas son los acuíferos, tanto por la disponibilidad y calidad que presentan las aguas de dichos confinamientos. Y si bien aún la información con la que se cuenta a la actualidad es insuficiente para tener una visión completa sobre el comportamiento y recarga de estos sistemas, es un principio para afirmar que el volumen de agua que aportan resulta vital para satisfacer las necesidades de la población. Es por ello, que surge la necesidad de generar información que permita dilucidar mediante qué estrategias se pueden recargar los acuíferos, para que los mismos permitan mantener un volumen suficiente para cubrir los requerimientos de la ciudad y de esta manera hacer frente a la inminente escasez hídrica producto de los efectos del calentamiento global.

## **1.2 Formulación del Problema**

### **1.2.1 Problema General**

- ¿Cuál es la influencia las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) en la recarga hídrica de acuíferos estimada mediante el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky en la subcuenca del río Shullcas?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

- ¿Qué relación existe entre la recarga potencial de acuíferos y la cantidad de precipitación efectiva en la subcuenca del río Shullcas?
- ¿Cuál es la relación que existe entre la recarga potencial de acuíferos y la evapotranspiración real generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y su medio en la subcuenca del río Shullcas?
- ¿Qué relación existe entre la recarga potencial de acuíferos y la escorrentía presente en la subcuenca del río Shullcas?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Determinar la influencia de las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) en la recarga hídrica de acuíferos estimada mediante el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky en la subcuenca del río Shullcas.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Establecer la relación que existe entre la recarga potencial de acuíferos y la cantidad de precipitación efectiva en la subcuenca del río Shullcas.
- Establecer la relación que existe entre la recarga potencial de acuíferos y la evapotranspiración real generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y su medio en la subcuenca del río Shullcas.
- Establecer la relación que existe entre la recarga potencial de acuíferos y la escorrentía presente en la subcuenca del río Shullcas.

#### 1.4 Justificación

Actualmente se cuenta con una gran cantidad de estudios realizados en toda la Subcuenca del río Shullcas, los cuales hacen referencia a las diversas problemáticas que se presentan en esta zona; sin embargo cabe resaltar que no existe información alguna que detalle la relación de las diversas plantaciones con la recarga hídrica de acuíferos presentes en la subcuenca del río Shullcas. Es por ello que el presente trabajo de investigación surge ante la necesidad de generar información sobre la influencia de una especie nativa como es el *Polylepis racemosa* (Quinual) en la recarga de acuíferos. Este conocimiento resulta vital, teniendo en cuenta que actualmente la subcuenca presenta un estrés hídrico, el cual se puede agravar si las reservas subterráneas de agua no se recargan lo suficiente como para compensar el déficit de abastecimiento de aguas superficiales.

Las aguas subterráneas a la fecha suministran un volumen importante para cubrir el requerimiento de la población, pero no se debe ignorar que el volumen de estas fuentes se puede ver disminuido a causa de diversos factores como la deforestación. En consecuencia el conocimiento sobre la dinámica y recarga de los acuíferos permitiría dilucidar sobre el rol positivo de las plantaciones forestales en la recarga de las napas freáticas. En base a ello, se propiciaría la recarga para asegurar el volumen necesario para abastecer a la ciudad, evitando de esta manera que los pobladores padezcan las inclemencias de la escasez hídrica y se pueda evitar los conflictos por uso de agua entre el suministro para agua potable y la demanda hídrica requerida por el sector agrícola.

Asimismo la explotación de esta reserva debe ser sustentable en el tiempo garantizando la disponibilidad y calidad de la misma. Para ello la gestión de este recurso debe ser óptima invirtiéndose en infraestructura adecuada y proyectos de reforestación que generen mayor oferta hídrica y amparen el

crecimiento económico de la población mediante la dotación de líquido elemento necesario para el desarrollo de actividades básicas de saneamiento así como de la agricultura, industria y energía.

### **1.5 Importancia**

La importancia de la actual investigación radica en que la información generada pueda ser empleada por distintas instituciones para futuros programas de reforestación a llevarse a cabo en la subcuenca. Además constituiría un precedente teórico importante para que otras regiones vulnerables puedan emplear esta estrategia de adaptación para proteger, conservar y recargar las aguas subterráneas, ya que los efectos del cambio climático colocan en riesgo la disponibilidad hídrica y por ende el desarrollo de actividades socioeconómicas de la población.

### **1.6 Limitaciones de la Investigación**

En el desarrollo de la investigación la principal limitación fue en cuanto a bibliografía, ya que no hay muchas referencias respecto al tema de estudio, debido a que la especie *Polylepis racemosa* es endémica de la zona y no se cuenta con información suficiente, siendo la mayor dificultad no encontrar el valor del coeficiente de cultivo ( $kc$ ) del *Polylepis racemosa* y en general del género *Polylepis*, usando para este estudio un  $kc$  teórico de 0,42 perteneciente a una asociación de pastos y árboles de *Polylepis*.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1 Marco Referencial**

##### **2.1.1 Antecedentes de la Investigación**

– Ávalos (2008) en su tesis titulado “Determinación de las áreas principales de recarga hídrica de la subcuenca del río Belejeyá del Municipio de Granados, Baja Verapaz”, realizado en la Universidad de San Carlos de Guatemala, facultad de Agronomía; concluye que; (1) La recarga hídrica natural del río Belejeyá es de 10 179 807 m<sup>3</sup>/año que representan 21,43 % de las precipitaciones del área. (2) Los valores de recarga muy altos se encuentran ubicados en la parte alta de la subcuenca, el volumen que aportan al sistema es de 1 190 112 m<sup>3</sup>/año que equivale al 21,69 % de la recarga total del área. (3) La zona calificada como recarga muy alta, presenta una superficie de 123,55 Ha con cobertura forestal y representa el 16,75 % de la extensión total de la masa boscosa de la subcuenca. (4) Zonas clasificadas como baja recarga con un aporte de 1 763 097 m<sup>3</sup>/año correspondiendo al 17,32 % de la recarga total.

Esta zona presenta una superficie de 1 606,39 Ha, que en su mayoría son áreas sin cobertura vegetal.

– Chacón (2003) en su tesis titulado “Efecto de la forestación sobre el balance hídrico en la zona del secano del centro de Chile”, realizado en la Universidad Austral de Chile, facultad de Ingeniería Forestal; concluye que; (1) Las pérdidas de agua por intercepción de dosel son la principal diferencia entre los componentes del balance hídrico de la pradera y las plantaciones de *Pinus radiata* en el secano interior del centro de nuestro país. (2) De los 630 mm de precipitación (con un déficit de 22 % a un año normal) que se registraron, la evapotranspiración para los rodales de alta densidad, baja densidad y la pradera fueron del 72,7 %, 76,8 % y 77 % de las precipitaciones anuales respectivamente. (3) La percolación para las mismas parcelas y pradera fueron de un 4,1 %, 6,2 % y 11,3 % de las precipitaciones totales. Las distintas densidades de cada una de las parcelas de *Pinus radiata* de este estudio produjeron diferentes alteraciones en el balance hídrico, afectando los montos de agua que alcanzaron el suelo, la cantidad de evapotranspiración, las tasas de percolación y con ello la variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo. (4) En las plantaciones las reservas de agua, durante el verano variaron hasta los 300 cm de profundidad, mientras que en la pradera solo hasta los 150 cm. (5) El escurrimiento fustal fue mayor en la plantación de mayor densidad, pero el aporte por árbol es mayor en la plantación de menor densidad. (6) Como no hubo diferencias en la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración neta, las diferencias de percolación deben atribuirse a las distintas pérdidas de agua por intercepción. (7) En el secano interior del centro de Chile la forestación tiene un impacto negativo sobre el almacenamiento de agua en el suelo y la percolación, debido a las pérdidas de agua por intercepción, que son las más altas registradas en Chile para plantaciones similares. (8) El efecto del raleo sobre los componentes del balance hídrico,

especialmente sobre las pérdidas de agua por interceptación, reducen el impacto de la forestación sobre la producción de agua.

– Álvarez (2010) en su tesis titulado “Influencia de la Cobertura de Bosque Nativo en la Generación de Escorrentía en el Sur de Chile: Estudio Comparativo de Microcuencas”, realizado en la Universidad de Chile, facultad de Ingeniería Civil; concluye que; (1) La disminución de la cobertura de bosque produciría un aumento en la generación de escorrentía de cuencas experimentales. Esta consistencia se observa en las relaciones inversas encontradas entre el área basal de los bosques y las componentes de caudal total, base y de escorrentía directa durante eventos de tormenta, a nivel mensual y estacional. Se incorpora la edad del bosque como factor determinante en el análisis, dadas las diferencias significativas en interceptación y evapotranspiración asociadas a las distintas edades. (2) Las relaciones encontradas entre las cuencas de renovales muestran que el manejo forestal de la cuenca, además de mejorar la calidad del bosque y producir recurso maderero, aumenta la cantidad de agua producida por la cuenca, principalmente en épocas verano.

### **2.1.2 Referencias Históricas**

– El artículo científico de Gonzáles y Rodríguez (2013) “Captura de agua en un bosque de *Polylepis pepeí* boliviano para mantener servicios ecosistémicos” tuvo como objetivo calcular el balance hídrico de un bosque de *Polylepis pepeí* para generar pautas de conservación que se requieran realizar a futuro. Los resultados arrojaron que la escorrentía superficial es de 6,7 %, la transpiración de la planta asciende 61 192 (L/m<sup>2</sup>)\*mes (33,7 %) y la capacidad de infiltración de la especie denota un valor de 108 222 (L/m<sup>2</sup>)\*mes representando el 59,6 % de la precipitación incidente, concluyendo que; (1) La baja evapotranspiración del *Polylepis pepeí* favorecen la infiltración de las precipitaciones y por consiguiente un incremento en la recarga hídrica de acuíferos.

– El artículo científico de De las Salas y García (2000) titulado “Balance Hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristóbal, Bogotá”, y cuyo objetivo fue evaluar el comportamiento hídrico de tres sitios de la cuenca alta del río San Cristóbal cubiertos con tres tipos de vegetación (ciprés, eucalipto y bosque nativo) tuvo como resultados que las tasas de almacenamiento en los primeros 40 cm oscilaron entre los rangos de (362 mm - 391 mm), en cuanto a la precipitación interna se obtuvo 81 % para bosques montanos, el mayor valor registrado para interceptación en el presente estudio fue de 56 % para la cobertura de Ciprés y la tasa anual de evapotranspiración gira en torno a los 1000mm en las coberturas del Bosque Natural (BN), Eucalipto (E) y Ciprés (C) seleccionadas para el balance hídrico. De esta cifra, 62 % corre a cargo de la transpiración en BN, 74 % en E y 27 % en C y concluye que (1) No se obtuvieron evidencias de que la vegetación natural (BN) en la presente investigación evapotranspire menos que las otras dos coberturas vegetales comparadas; Eucalipto (E) y Ciprés (C). Sin embargo, el almacenamiento de agua en el suelo bajo BN (46 %) contra E (42 %) y C (36 %) sugiere una mayor eficiencia hídrica del BN.(2) Contrario a lo esperado, el mayor rendimiento hídrico [ $39 \text{ (L/s)*km}^2$ ] se registró en la microcuenca Palo Blanco parcialmente cubierta por Ciprés. (3) Las mayores tasas de transpiración se registraron en la cobertura de eucalipto tanto in situ (756 mm/año) como en la microcuenca (746 mm/año) y las más bajas en ciprés in situ (283 mm/año), microcuenca (214 mm/año). Un lugar intermedio ocupó el sitio bajo bosque nativo (626 mm/año), microcuenca (235 mm/año). (4) La infiltración del suelo, calculada utilizando lisímetros de tensión colocados a 20 cm y 40 cm por debajo de la superficie, arrojó valores despreciables para el balance hídrico en coberturas vegetales. Teniendo en cuenta la importancia de este parámetro para la regulación del flujo hídrico en las microcuencas, es necesario usar una mejor tecnología. (5) La importancia de obtener registros confiables para un óptimo manejo del agua en las cuencas que surten de agua a Bogotá, no se

discute. Por lo tanto esta investigación amerita continuarse por un periodo no inferior a cinco años.

– El artículo científico de Oyarzún, Huber y Ellies (1985) titulado “Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera II: Humedad del suelo y evapotranspiración”, y cuyo objetivo fue estudiar el contenido de agua del suelo y la cantidad de agua consumida por evapotranspiración, en tres plantaciones de *Pinus radiata*; adulto de 26 años, joven de 9 años con manejo tradicional y joven de 9 años destinado a silvopastoreo y una pradera natural, en el sur de Chile, tuvo como resultados que las reservas de agua del suelo, durante el verano se agotaron considerablemente hasta los 250 cm de profundidad en las 3 plantaciones, mientras que en la pradera esta situación solamente se registró en los primeros 100 cm de suelo. La evapotranspiración entre el 1 de octubre de 1982 y el 21 de abril de 1983 para los rodales adulto, tradicional y silvopastoreo fue de 1057 mm; 1009 mm y 999 mm respectivamente, mientras que para la pradera entre el 28 de octubre y 21 de abril fue de 501 mm. La evapotranspiración para el período de mediciones correspondió al 76% en los bosques adulto y tradicional y al 63 % en el rodal silvopastoreo, con respecto a la precipitación neta anual. La misma relación para la pradera, pero con la evapotranspiración del período 28 de octubre a 21 de abril, representó solo el 29 %. La investigación concluye en qué; (1) A partir de octubre, disminuyeron progresivamente las reservas de agua en el suelo, debido a los escasos aportes por precipitación y alto uso-consumo. Esta tendencia se nota principalmente en los tratamientos con rodales jóvenes, lo cual puede ser atribuido al hecho de que estas plantaciones inician su consumo de agua en forma más intensa en esta estación del año, en comparación al bosque adulto (2) En el bosque adulto, el agotamiento del agua se produce en forma más retardada. Desde mediados de enero y hasta fines de marzo las reservas de agua en los rodales, jóvenes prácticamente está agotadas, mientras que en rodal adulto el decrecimiento continúa en forma lenta hasta

fines de marzo, debido principalmente a la mayor profundidad de su sistema radicular, lo cual indica que su uso-consumo para este período sigue más activo. (3) La disminución del agua de reserva en la pradera se muestra considerablemente menor que la de las tres plantaciones, dado que la distribución del sistema radicular de esta cubierta vegetal permite que la desecación del suelo se restrinja principalmente a la superficie, deduciendo que las reservas de agua del suelo en una pradera son marcadamente mayores que en plantaciones de *Pinus radiata*, especialmente durante el período de primavera. (4) Para un adecuado manejo de cuencas conocer la redistribución de las precipitaciones y los montos de uso-consumo de una especie introducida, que puede alterar los ciclos hidrológicos y con ello, otras actividades económicas. (5) Los resultados obtenidos en rodales de *Pinus radiata* no deben extrapolarse a bosques nativos, debido a que aparentemente en ellos el balance hídrico permite un mayor reflujó de agua al ciclo hidrológico.

– El artículo científico de Blanco (2010) titulado “Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica” tuvo por objetivo determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea. Los resultados que obtenidos sostienen que (1) Las ARH pertenecientes a la microcuenca Palo generan un volumen de 14 716 382 (m<sup>3</sup>/año), representando el 61 % del total. (2) Por su parte las ARH de la microcuenca Marín generan un volumen de 3 609 263 (m<sup>3</sup>/año). (3) En la microcuenca Rafaelito las ARH recargan un volumen de 5 568 884 (m<sup>3</sup> /año). En base a dichos resultados se concluyó que (1) En las 25 ARH seleccionadas previamente se da una importante recarga potencial del acuífero (Rp), debido en gran medida a las características físicas del suelo, las cuales favorecen la retención de humedad y percolación directa del agua hacia un posible acuífero existente en la zona. (2) No obstante, las ARH con ausencia de cobertura vegetal boscosa, presentan una menor capacidad para almacenar la humedad y su aporte se da debido a la percolación del agua, que en gran

parte se presenta cuando ocurren las precipitaciones. (3) En las ARH cubiertas por bosque, se presenta una mayor capacidad para almacenar la humedad. (4) En general, es de suma importancia la planificación y manejo de las 25 ARH identificadas, con el fin de mantener y aumentar el caudal de los 10 manantiales que abastecen de agua potable a una población aproximada de 6 500 habitantes de las comunidades de San Juan, San Luis, Linda Vista, el Quiosco y Monte Oreb.

– El artículo científico de Ríos, Andrade e Ibrahim (2008) titulado “Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos” tuvo por objetivo evaluar el impacto de sistemas silvopastoriles sobre el recurso hídrico en zonas de recarga de la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. Los resultados de la investigación manifestaron que las pasturas nativas sobrepastoreadas (PD) presentaron la mayor escorrentía, seguida por las pasturas nativas con árboles (PNA), mientras que las pasturas mejoradas con árboles (PMA) y el bosque secundario intervenido (BSI) presentaron los valores más bajos (28 %, 27 %, 15 % y 7 %, respectivamente), el BSI presentó la mayor infiltración; mientras que las pasturas con árboles (PMA y PNA) permitieron infiltrar más que las PD (3,54 cm/h; 0,23 cm/h; 0,19 cm/h y 0,07 cm/h respectivamente), por otro lado la cobertura arbórea se correlacionó negativamente con la escorrentía ( $r = -0,71$ ;  $P=0,01$ ) y positivamente con la infiltración ( $r = 0,75$ ;  $P=0,01$ ). Finalmente la investigación concluye en; (1) Los sistemas silvopastoriles, al tener el componente arbóreo, mostraron mayores beneficios hidrológicos en la zona de recarga, ya que disminuyeron la escorrentía superficial e incrementaron la infiltración, favoreciendo una mayor conservación de agua en el suelo

– El artículo científico de Arroyo (2013) titulado “Balance hídrico superficial mediante el método del índice climático del Valle del Mantaro, 2010 al 2013” y cuyo objetivo fue determinar el balance hídrico superficial del Valle del Mantaro

por cambios en el sistema de evapotranspiración, precipitación y escorrentía durante el período 2010 al 2013 tuvo como resultados que el valor del índice hídrico superficial anual (Im) para el periodo evaluado fue de 55,72; el índice de humedad 42,7; el índice de aridez (Ia) -21,71 y la escorrentía anual (Qa) fue de 412 mm. Concluyendo que ; (1) El balance hídrico superficial del Valle del Mantaro, muestra en función del índice de aridez un déficit estacional de agua para los meses de junio, julio, agosto y setiembre que corresponde al invierno y en función del índice de humedad muestra un exceso para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo que corresponde al verano; estos valores se contrastan con el coeficiente del déficit de agua para los meses de mayo y se prolonga hasta el mes de setiembre, abarcando desde la temporada de finales del otoño hasta los finales del invierno.

– El artículo científico de Gómez et. al (2014) titulado “Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas” tuvo como objetivo evaluar y determinar el uso del suelo con mayor tasa de infiltración en la subcuenca del río Shullcas en Huancayo. Los resultados de esta investigación resolvieron que las tasas de infiltración promedio fueron: 25,52 cm/h para las tierras forestales; 12,42 cm/h para las tierras agrícolas y 2,07 cm/h para las tierras de pastoreo; además, solo el 12,63 % de la subcuenca del río Shullcas tiene infiltración representativa, entre 0,2 cm/h y 25 cm/h, llegando a la conclusión que; (1) Las tierras forestales tienen la infiltración promedio más alta, clasificada como demasiado rápida; (2) Las tierras agrícolas poseen la clasificada como rápida; y las tierras de pastoreo, la clasificada como moderada.

## **2.2 Marco Legal**

– CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL PERÚ – 1993

Artículo 2°.- Toda persona tiene derecho:

22. A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como gozar de un ambiente equilibrado y adecuado desarrollo de su vida.

– ESTRATEGIA NACIONAL ANTE CAMBIO CLIMÁTICO – D.S N° 086 – 2003 – PCM

Objetivo.- “Reducir los impactos adversos al cambio climático, a través de estudios integrados de vulnerabilidad y adaptación, que identificaran zonas y/o sectores vulnerables en el país, donde se implementen proyectos de adaptación...”

– LEY GENERAL DEL AMBIENTE N° 28611 – modificado por D.L N° 1055

Artículo 9.- Del objetivo

La Política Nacional del Ambiente tiene por objetivo mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, viables y funcionales en el largo plazo; y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes, la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, de una manera responsable y congruente con el respeto de los derechos fundamentales de la persona.

– LEY DE RECURSOS HÍDRICOS N° 29338 – D.S N° 001 – 2010 – AG

Artículo 3º.- Declaratoria de interés nacional y necesidad pública Declárase de interés nacional y necesidad pública la gestión integrada de los recursos hídricos con el propósito de lograr eficiencia y sostenibilidad en el manejo de las cuencas hidrográficas y los acuíferos para la conservación e incremento del agua, así como asegurar su calidad fomentando una nueva cultura del agua, para garantizar la satisfacción de la demanda de las actuales y futuras generaciones.

– REGLAMENTO DE LA LEY DE RECURSOS HÍDRICOS – Aprobada D.S N° 001 – 2010 – AG y su modificación D.S N° 024 – 2014 – MINAGRI

Artículo 225°.- De la definición de agua subterránea

225.1 Para efectos de la Ley y el Reglamento, se consideran aguas subterráneas las que dentro del ciclo hidrológico, se encuentran en la etapa de circulación o almacenadas debajo de la superficie del terreno y dentro del medio poroso, fracturas de las rocas u otras formaciones geológicas, que para su extracción y utilización se requiere la realización de obras específicas.

Artículo 231°.- De la recarga de acuíferos

231.1 Se entiende por recarga artificial de acuíferos a la recuperación de su volumen natural e incluso su aumento, como resultado de la intervención humana por medio de perforaciones, de pozos excavados o de la infiltración de agua a través de la superficie del terreno por infraestructura hidráulica.

– LEY FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE N° 29763

Artículo 3°.- Actividades forestales y de fauna silvestre, y conexas. Para los efectos de la presente Ley, se consideran actividades forestales y de fauna silvestre, las siguientes:

b) La forestación y reforestación.

### **2.3 Marco Conceptual**

– *Adaptación:* implica modificar el comportamiento, los medios de vida, la infraestructura, las leyes, políticas e instituciones en respuesta a los eventos climáticos experimentados o esperados.

– *Acuíferos:* formación geológica que es capaz de almacenar y permitir el tránsito de agua subterránea en cantidades significativas, de modo que puede ser explotable y por tanto extraerse mediante obras de captación.

- *Balance Hídrico*: método que se fundamenta en la aplicación del principio de conservación de masas, derivando en la ecuación general hidrológica: donde los principales elementos de entradas y salidas naturales, están dados por la precipitación, el escurrimiento superficial, la infiltración y la evapotranspiración.
- *Cambio Climático*: todo cambio producido en el clima a lo largo del tiempo ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana.
- *Capacidad de Campo*: límite superior de agua aprovechable o disponible para el desarrollo de las plantas. Concentra el máximo contenido de humedad que un suelo puede retener para el aprovechamiento por la zona radicular.
- *Especie endémica*: Toda especie cuyo rango de distribución natural está limitado a una zona geográfica restringida, no teniendo distribución natural fuera de ella.
- *Especie Exótica*: Toda especie cuyas poblaciones silvestres no se distribuyen en forma natural en un ámbito geográfico determinado, pudiendo tratarse de una región, país o continente, habiéndose desarrollado en condiciones ecológicas diferentes; por tanto, originalmente no forman parte de los procesos ecológicos de los ecosistemas presentes en el ámbito geográfico del área o zona donde ha sido introducida generalmente por factores antropogénicos, en forma intencional o fortuita.
- *Estrés hídrico*: situación caracterizada por una demanda mayor de agua, que la cantidad disponible durante un periodo determinado; también se genera estrés hídrico cuando el uso del agua se ve restringido por su baja

calidad. Provocando un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad (acuíferos sobre explotados, ríos secos, etc.) y de calidad (eutrofización, contaminación de la materia orgánica, intrusión salina, etc.).

- *Polylepis racemosa (Quinual)*: vegetación natural y endémica de gran parte de los Andes centrales a altitudes entre 3500 m.s.n.m. y 4400 m.s.n.m., pueden soportar temperaturas extremadamente frías, heladas, vientos fuertes y un estrés hídrico constante.
- *Punto de Marchitez Permanente*: límite inferior de humedad aprovechable para las plantas debido a la fuerte retención del agua por el terreno, ya que por debajo de este umbral la tasa de absorción de agua por parte de las raíces es tan lenta e insuficiente para satisfacer los requerimientos de transpiración que resulta limitante para la sobrevivencia de las plantas.
- *Recarga Hídrica*: proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior, además se define este fenómeno como un proceso por el cual el exceso de agua por infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continua circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada, hasta la capa freática.
- *Subcuenca*: Unidad de drenaje de menor superficie que una cuenca y que forma parte de esta, constituyendo un tributario de la misma, o sea una cuenca que sale o que drena a una cuenca más grande.

## **2.4 Marco Teórico**

### **2.4.1 Fisiografía de Los Andes**

#### **2.4.1.1 Geomorfología**

El continente de América del Sur abarca un área de 18.6 millones de km<sup>2</sup> y es considerada como una compleja asociación de diferentes formaciones rocosas que evolucionaron hace más de tres billones de años. En consecuencia la mayor parte está conformado principalmente por rocas de origen precámbricas, las cuales están expuestas en la superficie sobre grandes áreas y en partes del cinturón montañoso de los Andes, siendo predominantes tres grandes tipos de estructuras (Argollo, 2006).

#### **A. Estructuras Predominantes**

- a) Macizos deformados: compuestos por rocas cristalinas precámbricas, cubiertas en algunos lugares por una lámina de rocas Paleozoicos, Mesozoicos y estratos más jóvenes (Argollo, 2006).
- b) Cuencas deformadas del precámbrico: rellenos con más de 4.000 m en espesor de rocas sedimentarias del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico (Argollo, 2006).
- c) Cordilleras andinas: conformadas por grandes cadenas de rocas plegadas de varias edades (Argollo, 2006).

#### **B. Proceso de Formación de Los Andes**

Una de las formaciones de mayor importancia es la Cordillera de los Andes, la cual se constituye como una de las cadenas montañosas más extensa del planeta con una longitud de 7240 km. Formada como consecuencia de la subducción de la placa oceánica Farallón-Nazca bajo la placa continental Sudamericana. Los múltiples procesos geomorfológicos que han intervenido reflejan una historia compleja de evolución desde el Proterozoico tardío (último ciclo orogénico) durante el Meso-Cenozoico. Este fenómeno de subducción es

en general el origen de un régimen tectónico globalmente compresivo y de un magmatismo de arco (Argollo, 2006).

a) Teorías

1º Tectónica de Placas: teoría unificadora enunciada por Harry Hess en 1963 en la que integra las teorías del Ciclo Geográfico de William Morris y los aportes de la teoría de la Deriva Continental de Alfred Wegener para sustentar la expansión del fondo oceánico, la deriva continental y los modelos de actividad sísmica y volcánica de la Tierra. Él manifiesta que las placas tectónicas se mueven gracias a las corrientes convectivas presentes en la pirósfera, siendo estos movimientos del tipo convergente si ocasionan un plegamiento leve de la corteza y una consecuente formación de cadenas de cordilleras, divergentes que dan lugar a las cordilleras submarinas llamadas también dorsales y por último los movimientos transformantes que producto del plegamiento mayor a causa del rozamiento de las placas origina fallas (Gass, Smith y Wilson, 2002).

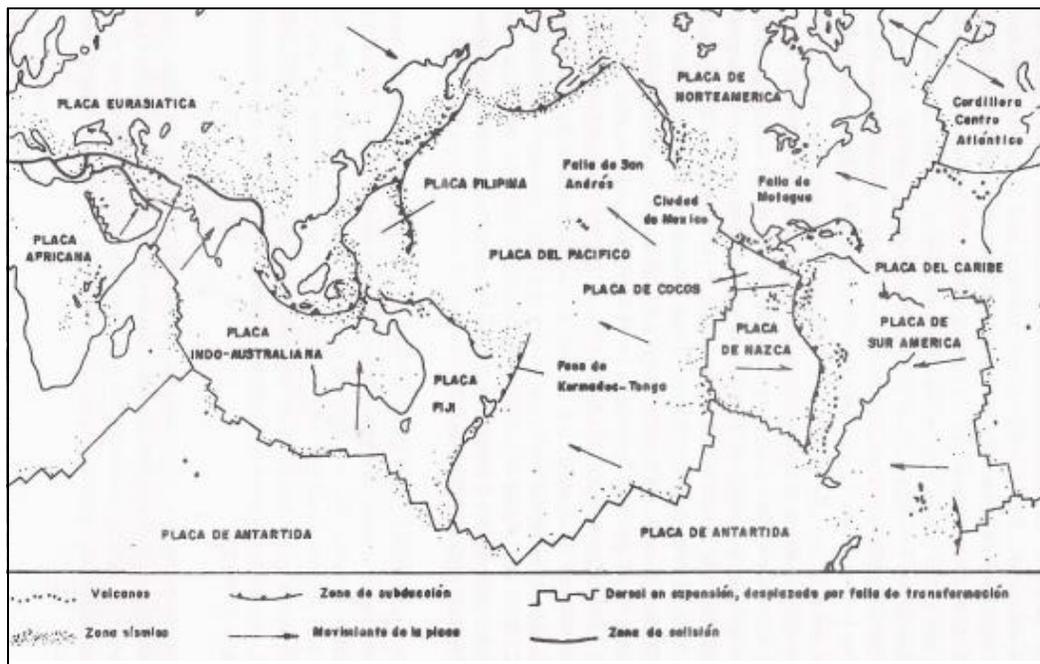


FIGURA N°5: Distribución de las Placas Tectónicas

FUENTE: "Conceptos Básicos de Sismología"

## 2º Tectónica Andina

Dalmayrac (1978) manifiesta que “la evolución de la tectónica andina a un nivel de estudio regional, se caracteriza por la sucesión de cuatro fases principales de compresión, de corta duración, separados por periodos de reposo tectónico o de distensión, durante la cual se han generaron la mayoría de las rocas plutónicas y volcánicas”.

— La fase del cretácico final (80 MA) afecta únicamente a la zona costera peruana situado en los bordes de las Cordillera Oriental del Perú Central (Dalmayrac, 1978).

— La fase del eocénico superior (45 a 40 MA) se localizó en la Cordillera Occidental y representa la mayoría de la tectónica andina (Dalmayrac, 1978).

— La fase del mioceno inferior (20 a 14 MA) afecta a la cadena, desde el lado del Pacífico hasta la Cordillera Oriental (Dalmayrac, 1978).

— La fase del mioceno-plioceno inferior (6 a 5 MA) es la responsable de la estructura de la zona subandina (Dalmayrac, 1978).

### **C. Segmentación de Los Andes**

A causa de la evolución sufrida por la estructura de la cadena andina en la era del Meso-Cenozoico, fue posible la distinción de tres segmentos prevalecientes (Gansser, 1973).

#### a) Andes del Norte

Es una de las regiones tectónicas más activas del continente entero, donde la convergencia constante de las tres placas está inexorablemente deformando un bloque de la corteza continental. Las zonas de mega-fallas que separan las tres cadenas que componen los Andes colombianos conforman las mayores estructuras en los Andes del norte, las fallas condujeron a la formación de cuencas en niveles altos en los cuales se acumularon sedimentos durante el Cenozoico superior, produciéndose así

uno de los más detallados registros de cambios ambientales del Plioceno y Cuaternario temprano en Sur América. Asimismo la subducción originó el desarrollo de muchos volcanes dando lugar con ello a una serie de cuencas y depósitos volcánicos que confirman que los movimientos tectónicos están formando constantemente la geomorfología de los Andes del norte (Argollo, 2006).

#### b) Andes Centrales

Es el segundo segmento más alto y de mayor extensión, su desarrollo estructural se divide en dos etapas principales separados por la disgregación del Gondwana; el desarrollo de la etapa preandina y el inicio de la subducción de la litosfera oceánica debajo de la placa continental sudamericana (Argollo, 2006).

##### 1º Dominios Morfo – Tectónicos:

Isaac (1988) distingue tres dominios longitudinales principales

##### — Perú Central

A diferencia de Los Andes del Norte, el Perú central está desprovisto de volcanismo Cuaternario, debido al bajo ángulo de subducción del segmento de la placa Nazca (Isaac, 1988).

- La Cordillera Blanca: Esta es la cadena montañosa más alta en todos los Andes con más de 10 cimas que sobrepasan los 6.000 m de altitud, es un macizo configurado exclusivamente de plutones graníticos y granodioríticos de la era del Mioceno y Plioceno, siendo una de las zonas más abruptas y profundas de los Andes (Isaac, 1988).
- La Cuenca Junín - Huancayo: ocupa una depresión estructural, es por ello que parte de la cuenca está rellena con depósitos lacustres del Cuaternario antiguo (Formación Jauja) que cubren depósitos aluviales. Los depósitos disectados por erosión fluvial del río Mantaro, dieron lugar a la formación de terrazas aluviales muy prominentes en la pared superior oeste del río, la composición de estos depósitos se basa en detritos los

cuales están asociados a la erosión glacial y glacio-fluvial (Mégard, 1978). Los depósitos aluviales formados fueron influenciados por diferentes fases de tectonismo característicos de los Andes Peruanos y Bolivianos durante el Plioceno y Cuaternario; la primera fase (Plioceno superior-Cuaternario Medio) fue dominado por la compresión y produjo plegamientos, fallas inversas y fallas transformantes; mientras que la segunda fase (Cuaternario Medio- Holoceno) estuvo caracterizada tanto por una etapa de compresión que afectó la región subandina este de la cadena montañosa principal y las cuencas intramontañas y una etapa de extensión (Sebrier, 1991).

- Falla del Huaytapallana: Estructura geológica del tipo inversa sinistral, originada por las fuertes deformaciones del macizo rocoso causada afines del Cretáceo. El escarpe que a la actualidad presenta la falla es consecuencia de la actividad sísmica del año 1969 produciéndose así su reactivación y afectando con ello morrenas cuaternarias y sus sustratos, conformado por rocas volcanosedimentarias del Paleozoico superior (Andinas, 2009).

#### — Altiplano – Puna

Las características morfológicas del segmento del Altiplano - Puna son en esencia el resultado del último episodio orogénico, el cual estuvo ligado a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. El Altiplano geomorfológicamente conforma una extensa depresión tectónica, que ha dado paso a la formación de cuencas endorreicas, y superficies planas de depósitos lagunares correspondientes a los grandes lagos que existieron episódicamente durante el Cuaternario, con extensos salares en el sur y lagos semi salados en el centro alimentados por las aguas del Lago Titicaca de agua dulce ubicado en la parte norte del Altiplano, mediante el río Desaguadero (Somoza, 1988).

#### — Sierras Pampeanas

Morfológicamente, las serranías se amoldan a las estructuras anticlinales, las cuales son atravesadas transversalmente por ríos en una etapa juvenil de erosión. Las estructuras incluyen una serie de bloques corticales del pre-Cámbrico a lo largo del sistema este de fallas inversas del oroclino boliviano. Los bloques condujeron al levantamiento inicial de las cadenas montañosas que llegaron a ser separados por depresiones (grabens) rellenos por sedimentos del Cenozoico (Strecker et al, 1989).

#### c) Andes del Sur

El segmento sur de los Andes Centrales posee relieve y morfología característica de una evolución tectónica, pero éstas fueron estudiadas en pocos lugares tanto en Chile como en Argentina (Isaac, 1988).

En consecuencia, el paisaje actual evolucionó a través de la interacción entre procesos tectónicos y denudación de estos segmentos estructurales por más de 160 MA (Isaac, 1988).

#### **2.4.1.2 Suelo**

Mujica y Holle (2001) sostienen que los intensos procesos de erosión y sedimentación (la cual estuvo interrumpida por actividad sísmica y volcánica), dieron origen a la formación de los suelos de Los Andes durante el Mesozoico marino.

De manera general, Hillel (1971) sostiene que el suelo es un sistema heterogéneo polifásico, particulado, disperso y poroso, distinguiendo en su estructura cuatro componentes ligados y mezclados entre sí.

#### **A. Factores de Formación**

El suelo es una entidad geológica que se estructura y evoluciona a través del tiempo bajo la influencia de factores físicos, químicos y biológicos. A la

actualidad se considera que son cinco los factores que intervienen activamente, los cuales a excepción del relieve fueron planteados desde un inicio por Dokuchaev (1899), posteriormente Jenny (1941) incorpora el factor relieve (Núñez, 2000).

a) Clima

Los parámetros que definen al clima como uno de los factores más importantes en la formación del suelo son la precipitación y la temperatura, esto se debe a que actúan como agentes modeladores del relieve, además, ejercen influencia y determinan otras interacciones como la distribución microbiana (Núñez, 2000).

b) Organismos

La diversidad de especies y la actividad desarrollada por la flora y fauna (meso, macro y micro) influyen drásticamente en las propiedades y procesos que se desarrollan en el suelo (Núñez, 2000).

1º Flora

Las fisuras provocadas por la acción física de las raíces permiten el ingreso de agua y aire. Asimismo la vegetación determina el tipo y contenido de materia orgánica presente en el suelo (Núñez, 2000).

2º Fauna

Constituye un indicador de la fertilidad de los suelos, ya que, engloba a los organismos pertenecientes a la mesofauna, macrofauna y microfauna que participan activamente en el proceso de descomposición de materia orgánica, reciclaje de nutrientes y transformación húmica (Núñez, 2000).

c) Relieve

Constituye la configuración física de la superficie; la pendiente es el elemento del relieve que tiene mayor incidencia en el proceso de formación ya que modifica el volumen de escorrentía, grado de erosión, condiciones climáticas

como el régimen de temperaturas y tipo de cobertura vegetal presente (Núñez, 2000).

d) Material Parental

La naturaleza mineralógica del material parental determina las características del suelo. Debido a que la mayoría de los suelos se han desarrollado a partir de material heterogéneo presentan gran variabilidad, no obstante entre su composición basal destacan las rocas ígneas y sedimentarias (Núñez, 2000).

e) Tiempo

Representa el periodo en el que el suelo ha ido evolucionando a través de los diversos procesos de meteorización, siendo notorios estos procesos en suelos maduros, los cuales presentan horizontes definidos, contrario a suelos jóvenes en los que aún es posible determinar el material parental (Núñez, 2000).

## **B. Procesos**

Navarro y Navarro (2013) sostienen que la formación de los suelos ha conllevado procesos complejos que se han desarrollado durante millones de años, los cuales son detallados a continuación:

a) Meteorización Física

Proceso paulatino que implica el desgaste de la roca madre en pedazos más pequeños que conservan la composición química del material parental. La tensión presente en las rocas que originan su fraccionamiento se debe a los cambios de temperatura (dilatación y contracción), humedecimiento (Navarro y Navarro, 2013).

b) Meteorización Química

Consiste en la descomposición vertiginosa que se caracteriza por la transformación y alteración química de los componentes iniciales del material parental. El agente químico responsable de provocar estas alteraciones es el

agua participando activamente en las reacciones de hidratación, hidrólisis, solución, oxidación y reducción (Navarro y Navarro, 2013).

c) Meteorización Biológica

Los organismos que habitan en el suelo desempeñan un rol importante en el proceso de formación ya que intervienen en la meteorización física, mediante el resquebrajamiento de la roca por acción de las raíces; meteorización química, por efecto de la actividad metabólica de las bacterias, determinando así la cantidad y variedad de materia orgánica presente en el suelo (Navarro y Navarro, 2013).

### **2.4.1.3 Clima**

#### **A. Clima de Los Andes Centrales**

El clima que presenta Los Andes es diverso presentando desde climas tropicales, sub tropical húmedo y seco hasta sub polar y glacial a gran altitud. Las singularidades topográficas de la Cordillera de Los Andes constituyen el principal factor de influencia, ya que configuran el pronunciado sistema de vientos de valle, modificadores del comportamiento de la humedad y temperatura (Lenters y Cook, 1997).

En los Andes Centrales ocurre una concentración de las masas de aire húmedas, sobre todo en sectores estrechos, originando sistemas de viento en ladera-valle que favorecen el desarrollo de una vegetación higrófila, asimismo, en los valles abiertos las masas de aire se disipan y por lo tanto son relativamente secos por ende la vegetación muestra un carácter xerófilo (Emck, 2006).

De manera general Thornthwaite (1985) define al clima como "Integración de los factores meteorológicos y climáticos que concurren para dar a una región su carácter y su individualidad"

## **B. Elementos Climáticos**

IICA (1984) define a los elementos como los aspectos físicos que integran el clima, entre los cuales destacan:

a) Radiación Solar: Cantidad de energía proveniente del sol que incide sobre la superficie terrestre.

1º Aparatos de Medida

- Piranómetro o Radiómetro: mide la radiación solar global directa o difusa que incide sobre una superficie terrestre.
- Pirheliómetro: mide la radiación directa del sol.
- Pirradiómetro o radiómetro neto: mide el balance neto de la radiación, de onda corta y larga en un punto.
- Heliógrafo de Campbell-Stokes: mide el número de horas de sol de cada día.

b) Temperatura del Aire: Indicador de la cantidad de energía calorífica presente en el mismo.

1º Aparatos de Medida

- Termómetro de Máxima: registra la temperatura máxima durante el día. Emplea al mercurio como líquido térmico.
- Termómetro de Mínima: registra la temperatura mínima durante el día. Emplea al alcohol como líquido térmico.
- Termógrafo: Aparato que proporciona un registro continuo de la temperatura del aire.

c) Presión Atmosférica: Se define como la fuerza que ejerce la atmósfera sobre la superficie terrestre, siendo variable en función de la altitud.

1º Aparatos de Medida

- Barómetro: mide la presión atmosférica.
- Barógrafo: registra a través de un gráfico las presiones atmosféricas.

d) Humedad Atmosférica: Cantidad de vapor de agua (humedad) presente en la atmósfera.

1º Aparatos de Medida

- Psicrómetro: determina la humedad contenida en la atmósfera.
- Higrógrafo: registra los distintos valores de humedad.

e) Viento: Desplazamiento horizontal del aire provocado por la diferencia de presión de un lugar a otro y está definido por su dirección y velocidad.

1º Efecto Coriolis: fuerza que modifica la trayectoria de los vientos desviándolos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

2º Aparatos de Medida

- Veleta: mide la dirección de los vientos según la rosa náutica
- Anemómetro: mide la velocidad del viento a través de la Escala de Beaufort.
- Anemógrafo: registra la dirección, la velocidad y el recorrido del viento.

#### **2.4.1.4 Hidrología**

##### **A. Cuenca Hidrográfica**

Campos (1998) refiere que una cuenca es una unidad de territorio que actúa como colector natural captando las aguas de las lluvias y transitándolas en forma de escurrimiento hacia un punto de salida de la cuenca.

##### **B. Índices y Parámetros Morfométricos**

a) Longitud del Cauce Principal: es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde la parte más alta hasta la salida. Este parámetro influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices

morfométricos. Se obtiene a partir del mapa digitalizado de la red de drenaje (Campos, 1998).

b) Elevación Media de la Cuenca: la variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones locales reinantes. Constituye un criterio de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región, el cual, da una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas de ella (Campos, 1998).

#### 1º Método Área – Elevación

Para estimar la elevación por este método, es necesario disponer de un mapa con curvas de nivel cuya separación altitudinal sea idéntica de nivel a nivel. Este método inicia con la medición del área de las diferentes franjas de terreno, delimitada por las curvas de nivel consecutivas y la divisoria de aguas (Campos, 1998).

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * e_i}{A_t}$$

Ec. (1)

Dónde:

- $E_m$ .....Elevación media de la cuenca (m)
- $A_i$ .....Área de cada franja ( $Km^2$  o  $m^2$ )
- $e_i$ .....Promedio de las curvas de nivel que delimita cada franja.
- $A_t$ .....Área total de la cuenca ( $Km^2$  o  $m^2$ )

c) Área: Es el tamaño de la superficie de la cuenca, se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren. También se ha comprobado que la relación del área con la longitud de la misma es

proporcional y también que esta inversamente relacionada a aspectos como la densidad de drenaje y el relieve relativo (Campos, 1998).

d) **Desnivel Altitudinal:** Es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Se relaciona con la variabilidad climática y ecológica. Una cuenca con mayor cantidad de pisos altitudinales puede albergar más ecosistemas al presentarse variaciones importantes en su precipitación y temperatura (Campos, 1998).

e) **Coeficiente de Forma ( $K_f$ ):** Este índice, propuesto por Gravelius, se estima a partir de la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca, longitud que se mide desde la salida hasta el punto más alejado a ésta (Campos, 1998).

El factor de forma, viene dado por:

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

Ec. (2)

Dónde:

- $A$  .....Elevación media de la cuenca ( $m$ )
- $L$ .....Longitud de la cuenca ( $m$ )

Este factor relaciona la forma de la cuenca con la de un cuadrado, correspondiendo un  $K_f = 1$  para regiones con esta forma, que es imaginaria. Un valor de  $K_f$  superior a la unidad nos proporciona el grado de achatamiento de la cuenca o el de un río principal corto. En consecuencia, con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

f) **Coeficiente de Compacidad ( $K_C$ ):** Propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio.  $K_C$  Se define como la razón entre el

perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parte aguas que la encierra y el perímetro de la circunferencia (Campos, 1998).

La ecuación que nos permite el cálculo de este coeficiente corresponde a:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ec. (3)

Dónde:

- $P$  .....Perímetro de la cuenca ( $m$ )
- $A$  .....Elevación media de la cuenca ( $m$ )

Existen tres categorías para la clasificación según el valor de este parámetro:

<i>TABLA N° 3: Clases de compacidad</i>	
<i>FUENTE: Campos (1998)</i>	
RANGOS DE $K_c$	CLASES DE COMPACIDAD
- 1,25	Redonda a Oval redonda
1,25 – 1,50	De Oval redonda a Oval oblonga
1,50 – 1.75	De Oval Oblonga a Rectangular Oblonga

g) Índice de Alargamiento ( $I_a$ ): Este índice propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente (Campos, 1998).

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Ec. (4)

Dónde:

- $L_m$ .....Longitud máxima de la cuenca ( $m$ )
- $l$ .....Ancho máximo de la cuenca ( $m$ )

Se clasifican mediante los siguientes rangos:

<i>TABLA N° 4: Clases de alargamiento</i>	
<i>FUENTE: Campos (1998)</i>	
RANGOS DE I	CLASES DE ALARGAMIENTO
0,0 – 1,4	Poco alargada
1,5 – 2,8	Moderadamente alargada
2,9 – 4,2	Muy alargada

h) Coeficiente de Masividad ( $K_m$ ): Representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Este valor toma valores bajos en cuencas montañosas y altos en cuencas llanas (Campos, 1998).

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (Km}^2\text{)}}$$

Ec. (5)

Se clasifican mediante los siguientes rangos:

<i>TABLA N° 5: Clases de masividad</i>	
<i>FUENTE: Campos (1998)</i>	
RANGOS DE $K_m$	CLASES DE MASIVIDAD
0 – 35	Muy montañosa
35 – 70	Montañosa
70 – 105	Moderadamente montañosa

i) Orden de Corriente: Aunque existen diferentes métodos para obtener este índice el método de Strahler es el más común por su facilidad de relacionar con otros parámetros morfométricos. Este índice indica el grado de estructura de la red de drenaje. En general, mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura más definida (Campos, 1998).

Se clasifican mediante los siguientes rangos:

<i>TABLA N° 6: Clases de orden</i>	
<i>FUENTE: Campos (1998)</i>	
RANGOS DE ORDENES	CLASES DE ORDEN
1 – 2	Orden Bajo
2,1 – 4	Orden Medio
4,1 – 6	Orden Alto

j) Densidad de Drenaje ( $D_d$ ): Este índice permite conocer la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca ya que refleja variaciones del relieve, topografía y vegetación, además de incorporar la influencia del hombre (Campos, 1998).

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

Ec. (6)

Dónde:

- $L$  .....Longitud de corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca ( $Km^2$ )
- $A$  .....Área de la cuenca ( $Km^2$ )

Se clasifican mediante los siguientes rangos:

<i>TABLA N° 7: Clases de densidad</i>	
<i>FUENTE: Campos (1998)</i>	
RANGOS DE DENSIDAD	CLASES DE DENSIDAD
1 – 1,8	Densidad baja
1,9 – 3,6	Densidad media
3,7 – 5,6	Densidad alta

k) Número de Escurrimientos: Indica la cantidad de afluentes naturales de la cuenca, mediante el uso de SIG.

l) Pendiente del Cauce Principal ( $S$ ): Campos (1998). La pendiente del cauce se la puede estimar por diferentes métodos, uno de ellos es el de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel  $H$  entre los puntos más elevado y más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce  $L$ :

$$S = \frac{H}{L}$$

Ec. (7)

Dónde:

- $S$  .....Pendiente media del cauce ( $Km$ )
- $H$  .....Desnivel entre el punto más alto y bajo ( $Km$ )
- $L$  .....Longitud del cauce ( $Km$ )

#### 2.4.1.5 Ecosistemas

##### A. Ecosistemas de Alta Montaña

La relevancia de los ecosistemas de alta montaña se debe a que concentran la cuarta parte de los bosques del mundo, el 20 % (1,2 mil millones) de la población mundial vive en las montañas o en sus bordes y la mitad de la humanidad depende, directa o indirectamente de la amplia gama de servicios ecosistémicos, tales como combustible, alimentos, agua y protección contra los riesgos naturales (Mc Morran y Price, 2001).

Los bosques de montaña desempeñan un rol importante como reguladores del proceso hidrológico de las cuencas alto andinas, debido a su particular cubierta vegetal influyen mucho en la cantidad y calidad de suministro de agua, reúnen una mega diversidad en flora, fauna y especies endémicas, además de actuar activamente en la prevención de la erosión y reducción del riesgo de inundaciones. Sin embargo, en las últimas décadas el incremento de las tendencias de deforestación y el cambio climático han afectado en gran medida

la integridad de estas zonas y por ende el abastecimiento de agua, y los diversos recursos que estos ecosistemas proporcionan a la humanidad (Gratzer, Duguma y Hager, 2001).

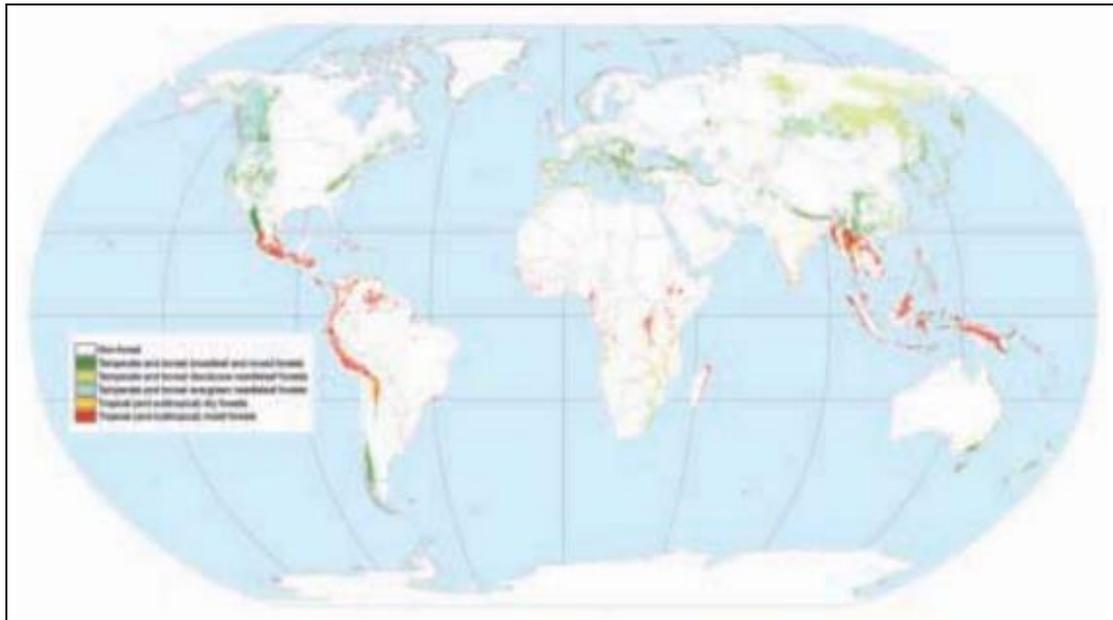


FIGURA N°6: Distribución de las Bosques de Montaña en el Mundo al año 2000

FUENTE: *Mountain Forests in a Changing World: Realizing values, addressing challenges*

#### a) Ecología de Los Andes Centrales

Kessler (2006) manifiesta que a la actualidad la vegetación de los Andes centrales está dominada por zonas agrícolas, pastizales y arbustivas, dejando relegadas las áreas boscosas, que por lo general, están conformadas por especies exóticas de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*.

De igual manera los bosques representados por especies nativas están restringidos a pequeñas áreas, siendo la especie oriunda más predominante el *Polylepis* seguida de especies leñosas como *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* y *Prumnopitys*.

## 1º Ecología del *Polylepis Racemosa* (Quinual)

Los bosques de *Polylepis* representan la vegetación natural y endémica de gran parte de los Andes centrales a altitudes entre 3 500 m.s.n.m y 4 400 m.s.n.m, cumplen una función importante en la ecología altoandina, no obstante, figuran como uno de los ecosistemas más amenazados del mundo.

### — Taxonomía

El género *Polylepis* engloba entre 15 y 28 especies, las cuales pertenecen a la subtribu Sanguisorbeae de la familia Rosaceae. En su mayoría, el género de *Polylepis* está representado por árboles que presentan una altura de 5 m. – 10 m., aunque también es común encontrar especies arbustivas (*P. Microphylla*, *P. Pepei*, *P. Tarapacana*, *P. Tomentella subesp. Nana*), no obstante *Polylepis Lanata* y *Pauta* llegan a superar los 25 m. (Simpson, 1979).

### — Evolución y Adaptación

- Evolución

Fjeldså (1995) sostiene que es muy presumible, que la evolución del género *Polylepis* estuvo sujeta y dominada por las marcadas fluctuaciones climáticas durante el período del Pleistoceno.

Las especies filogenéticamente basales de *Polylepis* sugieren árboles con abundantes flores, hojas y cortezas delgadas, sin embargo las extremas condiciones ambientales de Los Andes encaminaron una subsiguiente evolución que se adapte a las amplias fluctuaciones de temperatura, heladas y sobrevivencia a intensos periodos de sequía en dirección a una especie con pocas flores, así como hojas y cortezas más gruesas (Simpson, 1986).

- Adaptación

La exposición a condiciones climáticas extremas limitan y muchas veces llegan a impedir el desarrollo de otras especies arbóreas, sin embargo el proceso de adaptación sufrido por el *Polylepis* dotó a esta especie de una gama de atributos funcionales, que juegan un papel fundamental en su supervivencia permitiéndoles soportar temperaturas extremadamente frías, heladas, vientos fuertes y un estrés hídrico constante debido a los variables regímenes de precipitaciones (Fjeldså y Kessler, 1996).

Los mecanismos de resistencia a bajas temperaturas desarrollados por las especies de *Polylepis*, demuestran el grado de adaptación que poseen para sobrevivir a condiciones inhóspitas, soportando fluctuaciones de -13 °C a 21 °C. Siendo el *P. Australis* uno de los más tolerantes al lograr desenvolverse sin dificultad a una temperatura mínima de -13,5 °C sin sufrir lesiones en sus tejidos y afectar su desarrollo normal (Aura y García, 2007).

TABLA N° 8: Temperatura mínima de resistencia, lesiones y de congelación durante época seca y húmeda para tres <i>Polylepis</i> estudiados							
FUENTE: Aura Azócar y García Núñez (2007)							
SPECIES	DRY SEASON TEMPERATURAS (°C)			WET SEASON TEMPERATURAS (°C)			RM
	Tmin	Injury	Freezing	Tmin	Injury	Freezing	
<i>P. sericea</i>	-4,5	-9,0	-8,5	-2,0	-8,0	-8,0	A
<i>P. tarapacana</i>	-13,0	-20,0	-3,5	-6,0	-21,0	-9,2	T
<i>P. australis</i>	-13,5	-24,0	-7,0	-2,0	-18,0	-6,0	T

— Endemismo

El género *Polylepis* se caracteriza ser endémica de la Cordillera de Los Andes, encontrando cerca de 27 especies de *Polylepis* en toda la cordillera. El Perú es el país que presenta mayor diversidad precisando la existencia de 19 especies de *Polylepis* en todo el territorio nacional de las

cuales 5 son endémicas de nuestro país entre las que destaca el *P. racemosa* y *P. incana* (Kessler y Schmidt-Lebuhn, 2006).

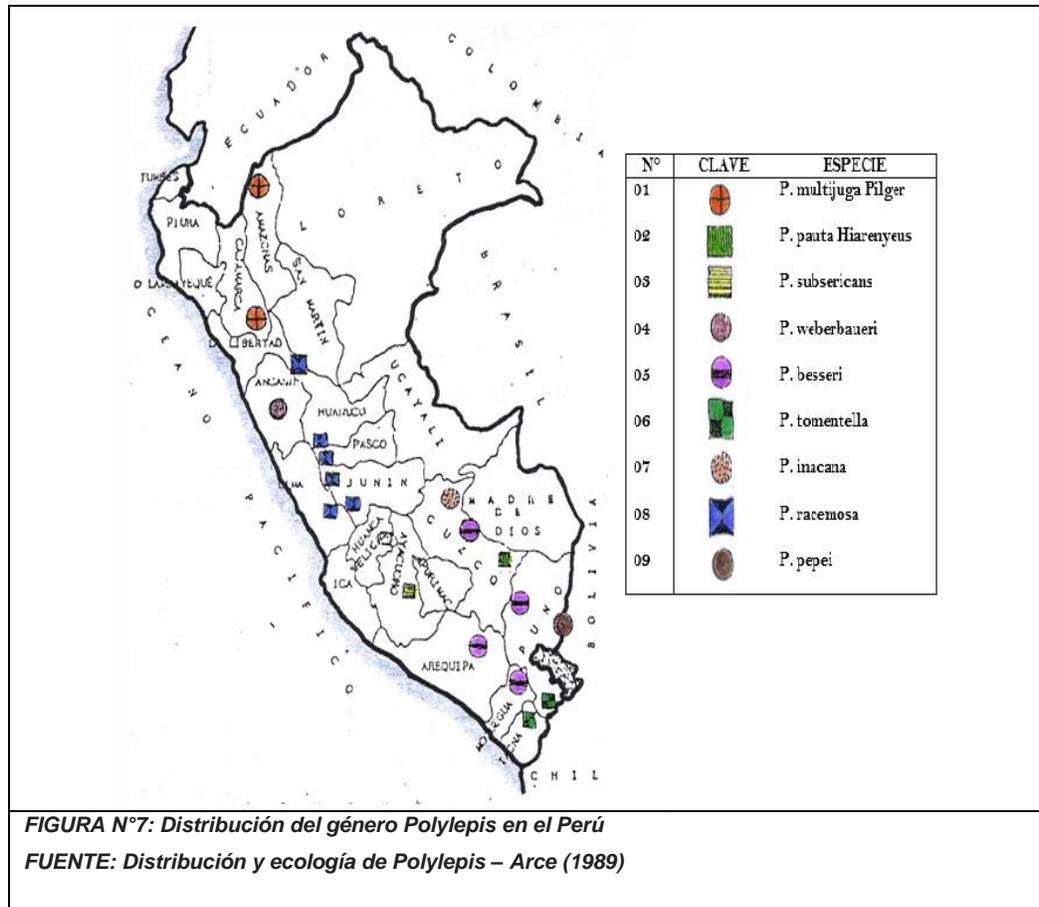
TABLA N° 9: Endemismo de las especies del género <i>Polylepis</i>		
FUENTE: Diversidad del género <i>Polylepis</i> (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes Peruanos – Mendoza y Cano (2011)		
PAÍS	ESPECIES	ENDEMISMO
Perú	19	5
Bolivia	13	4
Ecuador	7	2
Argentina	4	1
Colombia	3	1
Chile	2	0
Venezuela	1	0

#### — Hábitat y Distribución

Las cerca de 26 especies del género *Polylepis* abarcan una gran variedad de hábitats, poblando desde bosques de neblina hasta los volcanes áridos del Altiplano, aunque, a la actualidad los hábitats de estos bosques se fueron restringiendo a laderas rocosas, quebradas y matorrales abiertos en laderas montañosas (Kessler, 2006).

Hasta hace pocos años, este patrón de distribución fue considerado como natural, concibiendo a las laderas rocosas y quebradas como micro hábitats favorables para el desarrollo de *Polylepis*. Sin embargo, durante miles de décadas las actividades humanas en los Andes como las quemadas de pastizales, la agricultura intensiva y la deforestación han contribuido a la erradicación de aproximadamente el 95 % de estos bosques, restringiéndolos a hábitats especiales, en efecto, la distribución actual de los bosques de *Polylepis* es muy local (Simpson, 1986).

En nuestro país, la Cordillera Blanca es una de las pocas áreas que relativamente concentra grandes extensiones de *Polylepis* ya que la mayoría de bosques se limitan a pequeñas zonas, no obstante, se calcula que un 98 % de estos bosques han sido exterminados en el Perú (Fjeldsá y Kessler, 1996).

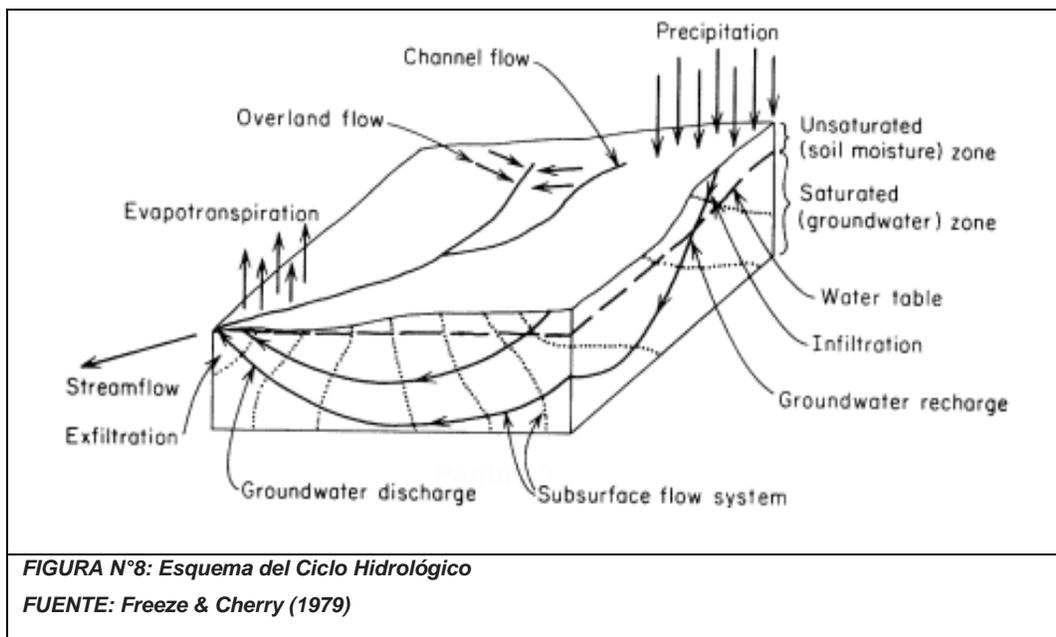


## 2.4.2 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico se define como un complejo sistema de circulación continua de agua entre el océano, la atmósfera y la tierra a gran escala, que asegura el bombeo, destilación y transporte del agua en todas sus formas (Linsley, 1998). La entrada al sistema hidrológico llega en forma de precipitación ya sea líquida o sólida, mientras que el caudal de salida tiene

lugar como escurrimiento y evapotranspiración, esta última es una combinación de la evaporación de los cuerpos de agua, la evaporación de la superficie del suelo, y la transpiración del suelo por las plantas (Freeze y Cherry, 1979).

De igual manera, el ciclo hidrológico implica la ascendencia del agua por la evaporación generada gracias a la energía del sol y desciende debido a la fuerza de la gravedad terrestre viéndose precipitada. La mayor parte de ésta es retenida temporalmente en el suelo (infiltración) y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación o transpiración de las plantas. Una porción restante penetra hacia zonas más profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en otros cuerpos de agua como manantiales, ríos o el mar (Aparicio, 1989).



#### 2.4.2.1 Procesos Hidrológicos en la Napa Freática

Los procesos hidrológicos del subsuelo son tan importantes como los procesos de la superficie, debido al gran aporte volumétrico que esta reserva aporta. Es la naturaleza de los materiales del subsuelo que controla las tasas de infiltración y las tasas de la escorrentía superficial, reflejando ello la importancia cuantitativa

de las aguas subterráneas en relación con los otros componentes del ciclo hidrológico (Freeze y Cherry, 1979).

Según las estimaciones de Lvovitch (1970) las aguas subterráneas representan casi los dos tercios de los recursos de agua dulce del mundo. Si tomamos en cuenta sólo el agua utilizable, es decir sin contar las capas de hielo, glaciares y las aguas de la atmósfera, el agua subterránea representa el 95 %; los lagos, pantanos, presas y ríos el 3,5 % y la humedad del suelo 1,5 %.

<i>TABLA N°10: Estimación del Balance de Agua del Mundo</i>					
<i>FUENTE: Nace, 1971</i>					
PARAMETER	SURFACE AREA (km <sup>3</sup> )x10 <sup>6</sup>	VOLUME (km <sup>3</sup> ) x10 <sup>6</sup>	VOLUME (%)	EQUIVALENT DEPTH (m)*	RESIDENCE TIME
Oceans and seas	361	1370	94	2500	≈ 4000 years
Lakes and reservoirs	1,55	0,13	< 0,01	0,25	≈ 10 years
Swamps	< 0,1	< 0,01	< 0,01	0,007	1 - 10 years
River channels	< 0,1	< 0,01	< 0,01	0,003	≈ 2 weeks
Soil Moisture	130	0,07	< 0,01	0,13	2 weeks – 1 year
Groundwater	130	60	4	120	2 weeks – 10 000 years
Icecaps and glaciers	17,8	30	2	60	10 – 1000 years
Atmospheric water	504	0,01	< 0,01	0,025	≈ 10 days
Biospheric water	< 0,1	< 0,01	< 0,01	0,001	≈ 1 week
*Computed as though storage were uniformly distributed over the entire Surface of the Earth.					

### 2.4.3 ACUÍFEROS

Es una capa o formación geológica saturada que permite la facilidad de almacenamiento, tránsito y afloramiento del agua permitiendo ser utilizada por el hombre en cantidades económicamente significativas, haciendo posible su extracción de una forma rentable (Custodio y Llamas, 2001).

Para que un acuífero sea funcional, sus poros deben estar saturados de agua y ser lo suficientemente grandes para permitir que el agua se desplace

hacia los pozos o manantiales con caudal apreciable. Por tanto, los acuíferos son sistemas físicos que poseen ciertas características fundamentales de las cuales depende su funcionamiento. Estas características o parámetros permiten definir y en algunos casos predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas externalidades (Velasco, 1979).

**2.4.3.1 Parámetros:** Según Arocha (1980) los parámetros que determinan el funcionamiento de un acuífero son:

**A. Porosidad:** Es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos y está definida como la relación entre el volumen total ocupado por los poros y el volumen total del sólido, lo que se ilustra por medio de la relación:

$$\phi = \frac{V_{poros}}{V_{total}}$$

Ec. (8)

**B. Coeficiente de Almacenamiento:** También denominado rendimiento específico, es la cantidad de agua que puede ceder o almacenar una roca o formación y donde los factores determinantes son los pequeños efectos elásticos del agua y el espesor del acuífero.

**C. Potencial de Agua en el suelo:** Es la medida del agua que se mueve en el suelo cuando solo hay presencia de un desequilibrio de su estado energético.

**D. Conductividad Hidráulica:** La base de estudio del movimiento de agua y en general de líquidos en el suelo (medio poroso) es la llamada Ley de Darcy (establecida por Henry Darcy 1855-1856) que es una relación empírica entre la velocidad del agua y la carga a la que está sujeta.

**E. Permeabilidad:** Es un concepto más amplio que la conductividad hidráulica, ya que la permeabilidad depende además de las características del medio por

el que circula, el tipo de fluido; caracterizado a través de su densidad, peso específico y viscosidad. Cuando se trata de agua, las características anteriores son prácticamente constantes usando el término conductividad hidráulica.

**F. Transmisibilidad (T):** Medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua, definiéndose como el producto de la conductividad hidráulica del acuífero por su espesor saturado.

Estas características hacen posible que el perfil del suelo esté formado de sedimentos poco consolidados, o simplemente estructurados en capas mejor o peor definidas que permiten la circulación del agua.

Según Villón (2004), estas capas se clasifican en:

**A. Capa permeable:** Cuando sus propiedades transmisoras de agua son favorables o, al menos favorables en comparación con los estratos superiores o inferiores. En una capa de este tipo la resistencia al flujo vertical es pequeña y puede ser generalmente despreciada de forma que únicamente deben tenerse en cuenta las pérdidas de energía causadas por el flujo horizontal (Villón, 2004).

**B. Capa semipermeable:** Una capa se considera semipermeable si sus propiedades transmisoras de agua son relativamente desfavorables. El flujo de agua en las capas semipermeables se considera esencialmente vertical (Villón, 2004).

**C. Capa impermeable:** Las propiedades transmisoras de agua son tan desfavorables que solamente fluyen a través de ella, sea vertical u horizontal, cantidades de agua despreciables. Son poco frecuentes cerca de la superficie del suelo, pero muy comunes a mayores profundidades, donde han tenido lugar la compactación, cementación y otros procesos de consolidación (Villón, 2004).

### 2.4.3.2 Tipos de Acuíferos

#### A. Según la Capa Permeable

De acuerdo a la combinación que tengan las capas del perfil del suelo que contienen aguas subterráneas Villón (2004) clasifica a los acuíferos en:

a) Acuíferos Libres: Llamado también acuífero subestimado, freático o capa freática, es una formación permeable saturada limitada en su parte inferior por una capa impermeable. El límite superior está formado por la tabla de agua, la que se encuentra en equilibrio con la presión atmosférica. El agua en un acuífero libre se llama agua freática o libre. La recarga de este tipo de acuíferos se realiza principalmente por la infiltración de la precipitación a través del suelo y de la zona no saturada, o por infiltración de agua de ríos o lagos (Villón, 2004).

b) Acuíferos Semilibres: Es en realidad una formación casi semiconfinada, en la cual la conductividad hidráulica de la capa semipermeable es tan grande que el componente horizontal de flujo de esta capa no puede ser despreciada. Este tipo de acuífero es una forma intermedia entre el tradicional, acuífero semiconfinado y el acuífero libre (Villón, 2004).

c) Acuíferos Confinados: Denominados también cautivos, a presión o en carga, es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límite superior e inferior son capas impermeables. En los acuíferos confinados, la presión del agua en ellos, es generalmente mayor que la atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran en tales acuíferos permanecen por encima del nivel superior de las capas permeables. El agua de un acuífero confinado se denomina agua confinada o agua artesisiana. La recarga de un acuífero confinado procede principalmente de la lluvia que se infiltra directamente a través de la zona en la que aflora la formación acuífera, es decir, donde el acuífero se comporta como libre, o bien cuando está semiconfinado (Villón, 2004).

d) **Acuíferos Semiconfinados:** Es una formación permeable saturada, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable y el límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. En la capa superior se encuentra la tabla de agua, cuya altura difiere a menudo a la carga piezométrica y al agua confinada en la capa permeable (Villón, 2004).

## **B. De acuerdo a la movilidad del agua**

a) **Acuífero:** Formación geológica que contiene agua en cantidades apreciables y que permite que circule a través de ella con facilidad. Suministrando cantidades útiles de agua subterránea a manantiales naturales o pozos de agua (Villón, 2004).

b) **Acuitardo:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de ella con dificultad (Villón, 2004).

c) **Acuicludo:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella (Villón, 2004).

d) **Acuifugo:** Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule agua a través de ella (Villón, 2004).

## **C. Por la textura :** Herrera (1995) lleva a cabo una clasificación según la textura.

a) **Fisurales:** Conformado principalmente por calizas, dolomías, granitos y basaltos. La permeabilidad está determinada por grietas y fisuras (Herrera, 1995).

b) **Porosos:** Constituido por materiales detríticos con tamaño de arena como mínimo, destacan las gravas, arenas, arcosas, etc. que otorgan al acuífero una permeabilidad derivada de la porosidad intergranular (Herrera, 1995).

c) **Kársticos:** La permeabilidad de estos acuíferos es debida a la asociación de textura fisural y poroso, predominando las calcarenitas (Herrera, 1995).

#### **2.4.4 RECARGA HÍDRICA**

Se denomina recarga al proceso que implica la entrada de una porción de agua hasta la zona de saturación alcanzando los mantos acuíferos y propiciando el almacenamiento de los mismos, constituyendo así parte de las reservas subterráneas. Esta entrada puede darse de dos maneras; por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones de las capas que conforman el perfil del suelo (Custodio y Llamas, 1983).

La recarga de acuíferos es una parte primaria del balance hídrico por lo que su conocimiento y evaluación constituye un problema extremadamente complejo que requiere identificar los mecanismos a través de los cuales tiene lugar dicho proceso, así como el tipo y distribución espacial de las diferentes fuentes de agua que intervienen en cada evento de recarga (Custodio, 1997).

##### **2.4.4.1 Fuentes de Recarga**

La recarga a un acuífero puede darse gracias a diversas fuentes; ya sea naturalmente debido a la infiltración de la lluvia (la más importante en general), a las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación o por infiltraciones de embalses y depósitos. (Balek, 1988).

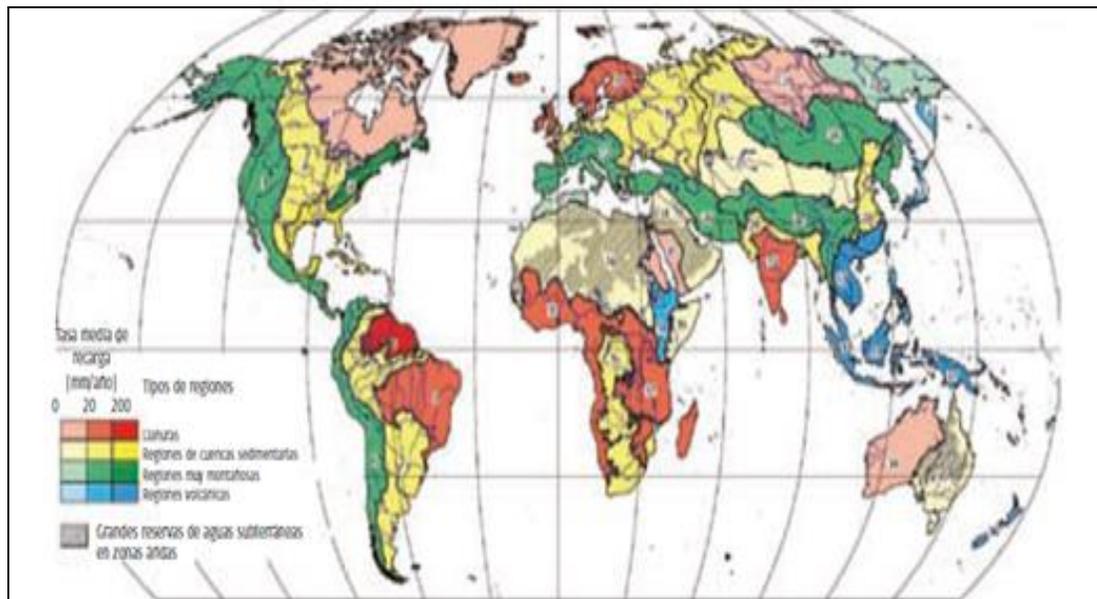
Las formas de recarga natural a los acuíferos son a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (ríos y lagos) o inducida debido a las actividades del hombre, como riego y urbanización (Custodio y Llamas, 2001).

Entre los tipos de recarga natural se distinguen:

### A. Recarga Directa:

Se define como el agua que se une a la reserva subterránea por percolación vertical directa de la precipitación, a través de la zona no saturada procedente de los excedentes de humedad en el suelo y de la evapotranspiración (Custodio y Llamas, 2001).

**B. Recarga Indirecta:** Es el resultado de la percolación hasta la superficie freática de la escorrentía superficial y de la localizada en depresiones topográficas como en zonas estancadas, lagunas, etc. (Custodio y Llamas, 2001).



**FIGURA N° 9: Regiones de Aguas Subterráneas del mundo: Modo predominante de presencia de Agua Subterránea y Tasa media de renovación**

**FUENTE: IGRAC (2004)**

### C. Métodos para Estimar la Recarga

Hay diversos métodos que se usan para cuantificar el volumen de recarga potencial de un acuífero, entre los que destacan:

- En base a la fuente de datos que utiliza cada técnica: Clasificación en base a la fuente de los datos que utiliza cada técnica incluyendo una

clasificación secundaria donde los métodos se subdividen en; técnicas físicas que toman datos del agua ubicada en la superficie, técnicas de trazadores que utilizan los datos de la zona no saturada y modelos numéricos que utilizan los datos de la zona saturada (Scanlon, Healy y Cook, 2002).

b) Otros autores como Samper (1997) clasifican los diferentes métodos de estimación de la recarga subterránea en cinco grupos; los cuales serán detallados a continuación:

1º Medidas Directas: Se trata de métodos in situ que permiten cuantificar el volumen de agua que se infiltra en el terreno, mediante lisímetros y medidores de infiltración. Estos métodos además de medir directamente el valor de la recarga tienen la ventaja de tener implícito un balance de masa, sin embargo, presentan un elevado coste de construcción y mantenimiento, además de que proporcionan únicamente medidas puntuales sobre la recarga producida por la precipitación. Al igual que la mayoría de métodos de estimación de la recarga, las técnicas directas son más apropiadas en zonas húmedas que en zonas áridas o semiáridas (Samper, 1997)

— Lisímetros: en la práctica de medidas directas del flujo de recarga, el lisímetro es el único método en el cual los diferentes componentes del balance de agua se miden con exactitud. Son tanques o bloques instrumentados que son hidrológicamente aislados del suelo que los rodea a efectos de medir el flujo que drena hasta el acuífero. Debido a que la construcción del lisímetro altera las condiciones iniciales del suelo, suele suceder que los valores estimados en los períodos iniciales difieran de los valores obtenidos una vez que se alcanzan de nuevo las condiciones naturales. (Allen et al. 1991).

— Medidores de infiltración: proporcionan estimaciones puntuales de los flujos de agua. Son instrumentos útiles fundamentalmente para la

determinación de las pérdidas por infiltración en canales de riego y ríos. Consiste en un cilindro que se introduce en la parte inferior del arroyo o lago y al cual se adjunta un depósito de agua; la velocidad a la cual el agua dentro del cilindro infiltra está determinada por los cambios en el volumen del depósito. A diferencia del método del lisímetro, este se caracteriza por ser asequible y fácil de aplicar (Kraatz y Mahajan, 1975).

2º Balance Hídrico: De acuerdo a Samper (1997) este método se fundamenta en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como la ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

En la práctica habitual solo algunos de los componentes de la ecuación del balance puede ser medido directamente (la precipitación), mientras que el resto (evapotranspiración potencial y real) debe ser estimado indirectamente a partir de fórmulas semi empíricas como las de (Thornthwaite C. W., 1948), (Coutagne, 1954) y (Turc, 1954). Constituyendo la mayor limitación de este método, ya que la exactitud de la estimación depende de la precisión con la cual fueron medidos los otros componentes, corriendo el riesgo así de añadir mayor incertidumbre al resultado final (Scanlon, Healy y Cook, 2002).

Sin embargo la serie de ventajas como el hecho de que tiene en cuenta todas las posibles fuentes, la disponibilidad de datos, la facilidad de aplicación, el reducido coste de ejecución y su aplicabilidad a todo tipo de fuentes de recarga hacen que se compensen las limitaciones convirtiéndose esta técnica en una de las más empleadas fundamentalmente en estudios orientados a la determinación de la evapotranspiración.

— Tipos de balance

Lerner (1990) es uno de los autores pioneros en presentar algunos tipos de balance hídrico:

- Balance de humedad del suelo: Relaciona los datos de entrada al balance conformado por la humedad adicionada por medio de la precipitación con los datos de salida como las pérdidas por evapotranspiración, escurrimiento y drenaje, además de los cambios en el contenido de humedad aprovechable en el perfil del suelo (Reddy, 1983).

— Balance Hídrico de Suelos (Schosinsky, 2006)

- Cálculo de la Fracción de lluvia interceptada por el Follaje (*Ret*)

$$\begin{aligned}
 & \text{Si } P \leq 5 \text{ mm/mes} \Rightarrow Ret = P \\
 & \text{Si } (P) * (Cfo) \geq 5 \text{ mm/mes} \Rightarrow Ret = (P) * (Cfo) \\
 & \text{Si } P > 5 \text{ mm/mes y } (P) * (Cfo) < 5 \text{ mm/mes} \Rightarrow Ret = 5
 \end{aligned}$$

Ec. (9)

Dónde:

- *Ret* .....Retención de lluvia en el follaje (*mm/mes*)
- *P* .....Precipitación mensual del mes (*mm/mes*)
- *Cfo* .....Coeficiente de retención del follaje (*adimensional*)

<i>TABLA N° 11: Valores de Coeficiente de retención del follaje</i>	
<i>FUENTE: Schosinsky (2006)</i>	
VALORES DEL COEFICIENTE DE RETENCIÓN DEL FOLLAJE ( <i>Cfo</i> )	
Bosques muy densos	<i>Cfo</i> = 0,20 ( <i>adimensional</i> )
Otros	<i>Cfo</i> = 0,12 ( <i>adimensional</i> )

- Infiltración

- Fracción que infiltra por textura de suelo ( $K_{fc}$ )

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154(fc) - 0,723 \Rightarrow fc \text{ oscila entre } 16 \text{ y } 1568 \text{ mm/día}$$

$$K_{fc} = 0.0148 * (fc)/16 \Rightarrow fc < 16 \text{ mm/día}$$

$$K_{fc} = 1 \Rightarrow fc > 1568 \text{ mm/día}$$

Ec. (10)

Dónde:

- $K_{fc}$ .....Fracción que infiltra por textura del suelo (*adimensional*)
- $fc$ .....Infiltración Básica del suelo (*mm/día*)

- Fracción que infiltra por efecto de la pendiente ( $k_p$ )

TABLA N° 12: Componentes del coeficiente de infiltración		
FUENTE: Schosinsky y Losilla (2000)		
POR PENDIENTE	PENDIENTE	Kp
Muy plana	0,02 % - 0,06 %	0,30
Plana	0,3 % - 0,4 %	0,20
Algo plana	1 % - 2 %	0,15
Promedio	2 % - 7 %	0,10
Fuerte	Mayor de 7%	0,06

- Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal ( $k_v$ )

TABLA N° 13: Componentes del coeficiente de infiltración	
FUENTE: Schosinsky y Losilla (2000)	
POR COBERTURA VEGETAL	Kv
Cobertura con zacate menos del 50 %	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75 %	0,21

- Coeficiente de infiltración del suelo ( $C_i$ )

$$\begin{aligned} C_i &= kfc + kp + kv \\ C_i > 1 &\Rightarrow C_i = 1 \end{aligned} \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde:

- $kfc$ .....Fracción que infiltra por textura del suelo  
(*adimensional*)
- $kp$  .....Fracción que infiltra por el efecto de la pendiente  
(*adimensional*)
- $kv$ .....Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (*adimensional*)

- Cálculo de la Precipitación Efectiva ( $P_{ef}$ )

$$P_{ef} = (C_i) * (P - Ret) \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

- $C_i$ .....Coeficiente de infiltración (*adimensional*)
- $P$  .....Precipitación mensual (*mm/mes*)
- $Ret$  .....Retención de lluvia mensual por el follaje (*mm/mes*)

- Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración ( $C_1$ )

$$C_1 = (HS_i - PMP + P_{ef}) / (CC - PMP) \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

- $HS_i$  .....Humedad inicial (*mm/mes*)
- $PMP$ .....Punto de Marchitez Permanente (*mm/mes*)
- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva (*mm/mes*)
- $CC$ .....Capacidad de Campo (*mm/mes*)

- Coeficiente de humedad al final del mes después de ocurrida la evapotranspiración ( $C2$ )

$$C2 = (HSi - PMP + P_{ef} - ETR1)/(CC - PMP)$$

$$ETR1 = (C1) * (ET_{cultivo})$$

Ec. (14)

Dónde:

- $HSi$ .....Humedad inicial ( $mm/mes$ )
- $PMP$ .....Punto de Marchitez Permanente ( $mm/mes$ )
- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva ( $mm/mes$ )
- $ETR1$ .....Evapotranspiración Potencial Real ( $mm/mes$ )
- $CC$ .....Capacidad de Campo ( $mm/mes$ )
- $ET_{cultivo}$ .....Evapotranspiración del Cultivo ( $mm/mes$ )

- Evapotranspiración Real Tentativa Promedio Mensual ( $ETPR$ )

$$ETPR = ((C1 + C2)/2) * ET_{cultivo}$$

$$Si C1 o C2 > 1 \Rightarrow C1 o C2 = 1$$

$$Si C1 o C2 (-) \Rightarrow C1 o C2 = 0$$

Ec. (15)

Dónde:

- $C1$ .....Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la  $ETP$  (*adimensional*)
- $C2$ .....Coeficiente de humedad mínimo, considerando la  $ETP$  (*adimensional*)
- $ET_{cultivo}$ .....Evapotranspiración del Cultivo ( $mm/mes$ )

- Humedad Disponible ( $HD$ )

$$HD = HSi + P_{ef} - PMP$$

Ec. (16)

Dónde:

- $HSi$ .....Humedad inicial ( $mm/mes$ )

- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva ( $mm/mes$ )
- $PMP$ .....Punto de Marchitez Permanente ( $mm/mes$ )

- Evapotranspiración Real ( $ETR$ )

$$\begin{aligned} Si ((C1 + C2)/2) * ET_{cult} \leq HD \Rightarrow ETR = ((C1 + C2)/2) * ET_{cult} \\ Si ((C1 + C2)/2) * ET_{cultivo} > HD \Rightarrow ETR = HD \end{aligned}$$

Ec. (17)

Dónde:

- $C1$ .....Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la  $ETP$  (*adimensional*)
- $C2$ .....Coeficiente de humedad mínimo, considerando la  $ETP$  (*adimensional*)
- $ET_{cultivo}$ .....Evapotranspiración del Cultivo ( $mm/mes$ )
- $HD$ .....Humedad Disponible ( $mm/mes$ )

- Humedad Inicial del Suelo ( $HSi$ )

Para determinar esta variable se seleccionan tres meses consecutivos en el que la precipitación efectiva supere la evapotranspiración de las plantaciones, asignando al mes siguiente de los meses consecutivos seleccionados una humedad inicial igual a la capacidad de campo (Schosinsky y Losilla, 2000).

- Humedad del Suelo al Final del mes ( $HSf$ )

$$\begin{aligned} Si (HD + PMP - ETR) < CC \Rightarrow HSf = (HD + PMP - ETR) \\ Si (HD + PMP - ETR) \geq CC \Rightarrow HSf = CC \end{aligned}$$

Ec. (18)

Dónde:

- $HD$ .....Humedad disponible ( $mm/mes$ )
- $PMP$ .....Punto de Marchitez Permanente ( $mm/mes$ )
- $ETR$  .....Evapotranspiración real ( $mm/mes$ )

- $HSi$ .....Humedad inicial ( $mm/mes$ )
- $CC$  .....Capacidad de Campo ( $mm/mes$ )

- Cálculo de la Escorrentía ( $ESC$ )

$$ESC = P - Ret - P_{ef}$$

Ec. (19)

Dónde:

- $P$ .....Precipitación mensual ( $mm/mes$ )
- $Ret$  .....Retención de lluvia mensual por el follaje ( $mm/mes$ )
- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva ( $mm/mes$ )

- Cálculo de la recarga potencial del acuífero ( $Rp$ )

$$Rp = P_{ef} + HSi - HSf - ETR - ESC$$

Ec. (20)

Dónde:

- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva ( $mm/mes$ )
- $HSi$  .....Humedad inicial ( $mm/mes$ )
- $HSf$  .....Humedad final ( $mm/mes$ )
- $ETR$  .....Evapotranspiración real ( $mm/mes$ )
- $ESC$ .....Escorrentía ( $mm/mes$ )

### 3º Fluctuación del nivel freático:

Este método uno de los más empleados para estimar la recarga, requiere el conocimiento del coeficiente del almacenamiento específico y de las variaciones temporales del nivel freático. El volumen almacenado producto de un aumento del nivel es igual a la recarga, luego de tener en cuenta otros flujos de entrada y salida como pozos de bombeo y flujo entre acuíferos (Reddy, 1983).

Entre sus ventajas, cabe citar la sencillez e independencia respecto al mecanismo de desplazamiento del agua en la zona no saturada. El rango

de desconfianza en las estimaciones obtenidas con este método están relacionadas con la limitada precisión con que se puede determinar el coeficiente de almacenamiento específico (Healy y Cook, 2002).

#### 4º Trazadores.

Son sustancias que introducidas al agua pueden ser detectadas por medios visuales o analíticos, demandando así gran conocimiento en cuanto al estudio y análisis de las propiedades del agua (López-Rodríguez, 1997).

Los trazadores a usarse son básicamente de dos tipos: artificial o natural. Entre los primeros destacan los colorantes orgánicos e inorgánicos los cuales son añadidos de forma premeditada. Por su parte la aplicación de los trazadores naturales (también denominados isótopos ambientales) se basa principalmente en la determinación de los isótopos estables de la molécula de agua H-2 (Deuterio) y Oxígeno-18, cuyo porcentaje está en función de los cambios de fase del agua durante el ciclo hidrológico, proporcionando así información que indica el proceso al que ha estado sujeta dicha molécula (Flury y Flühler, 1994).

Este método es uno de los más practicados en las fuentes de aguas subterráneas, pues permiten realizar determinaciones precisas sobre el origen; edad, distribución y calidad de las aguas. En el caso de las aguas superficiales, facilitan la determinación de reservorios, fugas a través de diques, tasa de evaporación, descarga de ríos y transporte de sedimentos (Hendrickx y Walker, 1997).

#### — Clasificación de trazadores

Los trazadores naturales y artificiales son de muy diverso tipo pero, básicamente se pueden agrupar en los siguientes grupos (Custodio y Custodio, 2001).

- Trazadores sólidos en suspensión.

- Trazadores químicos solubles electrólitos fuertes (salinos).
- Trazadores químicos colorantes.
- Trazadores radiactivos
- Trazadores isotópicos estables

#### **2.4.4.2 Factores que Determinan la Recarga**

El potencial de infiltración que posee un acuífero está en función de las interacciones que se pueden derivar entre la naturaleza del suelo (estructura, textura, porosidad), tipo de cobertura vegetal, formación geológica, contenido de humedad, topografía, relieve y principalmente la frecuencia de las precipitaciones, las cuales pueden favorecer o perjudicar el volumen de recarga de un acuífero.

De acuerdo a Orozco et al. (2003) los factores que determinan la recarga son:

**A. Clima:** Entre los factores principales del clima que intervienen en el proceso de recarga hídrica destacan:

##### a) Precipitación

###### 1º Precipitación Pluvial

Orozco et al. (2003) sostiene que la precipitación puede ser entendida como todas las formas de humedad que precipitan a la tierra en forma de llovizna, lluvia, escarcha y granizo, producto de la condensación del vapor de agua atmosférico. Además constituye la entrada primordial del sistema hidrológico y es considerado como un factor esencial para la determinación de la recarga hídrica.

Asimismo la eficiencia de la infiltración de las precipitaciones está condicionada por la duración e intensidad ya que una lluvia de prolongada duración e intensidad moderada infiltran más que las lluvias intensas, porque éstas saturan rápidamente el suelo provocándose que se pierda un gran volumen en forma de escorrentía superficial (Johnson, 1975).

— Tipos de precipitación en función de los procesos de formación:

De acuerdo a las condiciones que generan los movimientos verticales de aire, Custodio y Llamas (1983) clasifican a los tipos de precipitación en:

- Precipitación Convectiva: Se origina cuando asciende desde la superficie terrestre una masa de aire cálida, la cual se expande debido a su baja densidad, provocando que se vuelva inestable y se enfríe precipitando en forma de chubascos de lluvia, nieve o granizo, que por lo general son intensas y de corta duración (Campos, 1998).
- Precipitación Ciclónica: Son las más frecuentes ya que resultan del movimiento ascensional de grandes masas de aire en zonas de depresión barométrica. Se asocia a un frente frío o a un frente cálido; en los frentes fríos la precipitación generalmente es muy intensa y con presencia de tormentas y granizos. Por el contrario los frentes cálidos originan lluvias o lloviznas prolongadas pero de menor intensidad (Pulido, 2014).
- Precipitación Orográfica: Se produce cuando el ascenso del aire es interrumpido por un relieve orográfico (cordilleras o montañas). Afectando su distribución espacial ya que un lado de la montaña es la zona más lluviosa y el lado restante se constituye como la zona seca, esta influencia orográfica es tan marcada en terrenos quebrados que los patrones de las tormentas tienden a parecerse a aquellos de la precipitación media anual (Herrera, 1995).

— Métodos para determinar la precipitación

Para efectos de realizar estudios de balance hídrico es indispensable conocer el valor de la precipitación media sobre una cuenca o área específica, ya que la cantidad de lluvia que precipita en un determinado sitio difiere de la que cae en los alrededores. Existen tres métodos clásicos

para calcular el volumen de agua precipitada sobre una cuenca (Herrera, 1995), los cuales serán detallados a continuación:

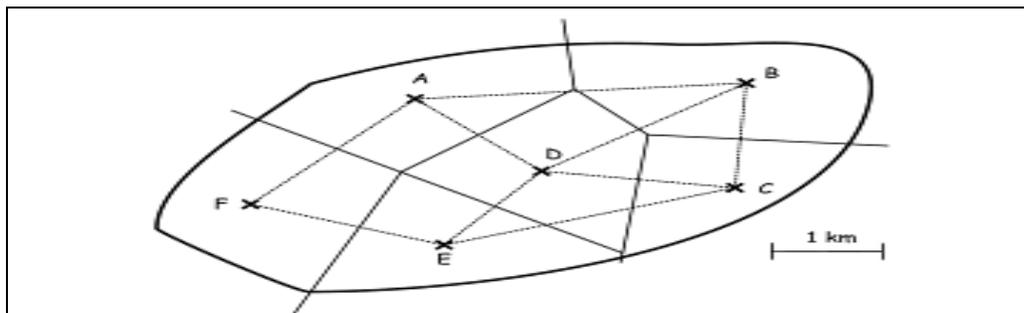
- **Media Aritmética:** Este método consiste en efectuar un promedio aritmético de los valores registrados por todas las estaciones pluviométricas para el periodo de tiempo considerado.

Aunque es un método práctico y de aplicabilidad sencilla no tiene en cuenta factores la variabilidad originada por la topografía de la cuenca, por lo que su aplicabilidad se restringe a estudios que no demanden gran precisión y/o en áreas poco accidentados con distribución uniforme de las precipitaciones (Martínez et al, 2005)

$$P_m = (P_1 + P_2 + \dots + P_n)/n$$

Ec. (21)

- **Polígonos de Thiessen:** Esta técnica se fundamenta en determinar el área de influencia de cada estación pluviométrica. La delimitación se construye en base a una triangulación de la cuenca y la precipitación de cada estación por el área de cada polígono representa el volumen de la precipitación preliminar. Finalmente la precipitación total de la cuenca es calculada mediante una media ponderada. Al igual que el anterior método no se contempla la fisiografía de la cuenca, por lo que los resultados son poco fiables en áreas de topografía abrupta (Martínez et al, 2005).



**FIGURA N° 10: Polígono de Thiessen de un área con seis estaciones pluviométricas**

**FUENTE: Fundamentos de Hidrogeología (2005)**

- **Curvas Isoyetas:** Los resultados de este método son más confiables ya que contempla los efectos orográficos, así como, la altitud de las estaciones al efectuar el trazado de las Isoyetas. Requiere de la gráfica de isolineas espaciadas entre sí por intervalos constantes de cantidad de precipitaciones para la posterior interpolación lineal de los datos previamente situados en un plano. Esta técnica demanda un amplio conocimiento del área y de las leyes de variación para el sector de este parámetro, además de contar con un banco de datos históricos de las precipitaciones media anual (Pulido, 2014).

$$P = \frac{\frac{P_1 + P_2}{2} S_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} S_2 + \dots + \frac{P_{n-1} + P_n}{2} S_n}{S_{Total}}$$

Ec. (22)

— Instrumentos para la medir la precipitación: Los instrumentos para medir la precipitación; según Pulido (2014) se dividen en dos grupos:

- Para medir la cantidad de precipitación:
  - **Pluviómetros:** Son recipientes estandarizados en los cuales puede medirse la lámina precipitada.
  - **Nivómetros:** Aparatos de similar diseño que los pluviómetros, tiene por finalidad medir la profundidad y espesor de la capa de nieve y convertirla en el equivalente de volumen de agua precipitada.
  - **Totalizadores:** Tienen por objeto registrar una sola medida de la precipitación total caída en un punto durante un largo periodo (año hidrológico, un verano, periodo de lluvias). Son visitados con escasa frecuencia ya que por lo general son instalados en lugares de difícil acceso.

- Para determinar la intensidad de la precipitación:
  - Pluviógrafos: Es un aparato que tiene por función registrar de forma continua la cantidad total de agua caída en un periodo de tiempo determinado, lo cual permite establecer la distribución e intensidad de las lluvias.

## 2º Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación que logra ser retenida e infiltrada por el suelo para que posteriormente esté disponible para satisfacer las necesidades de humedad parcial o total de la zona radicular, o percolarse al acuífero, por lo que la cuantificación del volumen de esta precipitación sirve para estimar el balance hídrico (Herrera, 1995)

— Factores que afectan la precipitación efectiva: La precipitación efectiva esta afectada por cuatro factores determinantes:

- Intensidad de la Precipitación

El aumento de la intensidad de las precipitaciones en periodos cortos satura rápidamente el suelo, provocando que se pierda un gran volumen a manera de escorrentía superficial, además de favorecer la actividad erosiva del suelo (Campos, 1998).

- Velocidad de Infiltración en el Suelo

Hillel (1980) sostiene que la velocidad de infiltración está sujeta a las características físicas del suelo tales como; la textura, el grado de compactación, densidad aparente, cantidad de materia orgánica y contenido de humedad inicial. Los suelos que presentan una textura gruesa como los arenosos y franco arenosos poseen mayor velocidad de infiltración que los suelos compuestos por arcillas, esto se debe al mayor tamaño de los espacios entre las partículas del suelo, asimismo la

saturación inicial del suelo disminuye significativamente la velocidad de infiltración.

TEXTURA DEL SUELO	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (mm/h)
Suelo arcilloso	1 – 5
Suelo limoso	8 – 12
Suelo arenoso	25 – 50

- Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal induce a que se produzca un mayor contacto entre suelo – agua, reduciendo la velocidad de escorrentía e incrementando la infiltración del agua de lluvia en comparación con los suelos desnudos, los cuales presentan enormes pérdidas a causa de la escorrentía (Suarez de Castro, 1979)

- Topografía.

Según Millar et al (1961) las zonas que presentan un relieve con pendientes moderadas y de gran longitud influyen significativamente en el incremento de velocidad y volumen de la escorrentía, pues el tiempo de permanencia del agua en el suelo es mínima, a diferencia de las superficies planas donde el agua presenta mayor poder de infiltración gracias al tiempo de contacto entre las precipitaciones y la superficie.

A partir de estos factores existen diversos métodos para calcular la precipitación efectiva (Padilla, 2003).

— Métodos para Calcular la Precipitación Efectiva:

- Método de Schosinsky y Losilla (2003): fórmula que integra aspectos relacionados con la cobertura vegetal, pendiente y velocidad de infiltración.

$$P_{ef} = (1 - Kv) * Ci * P$$

Ec. (23)

Dónde:

- $P_{ef}$ .....Precipitación efectiva (*mm/mes*)
- $P$  .....Precipitación mensual (*mm/mes*)
- $Ci$ .....Coeficiente de infiltración (*adimensional*)
- $Kv$  .....Constante de retención vegetal (*adimensional*)

- Método de Prescott y Anderson. Este método considera para el cálculo de la lluvia efectiva la precipitación media calculada en función de la evaporación media mensual y se compara con la precipitación media mensual, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{cm} = 0.9 * Ev^{0.75}$$

Ec. (24)

Dónde:

- $P_{cm}$ .....Precipitación media calculada (*cm/mes*)
- $Ev$ .....Evaporación mensual media, medida en el tanque tipo "A" (*cm/mes*)
- $P_m$ .....Precipitación media mensual (*cm/mes*)

Para calcular la precipitación efectiva ( $P_e$ ), se utiliza el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} \text{Si } P_{cm} > P_m &\Rightarrow P_e = 0 \\ \text{Si } P_{cm} < P_m &\Rightarrow P_e = 0,8 P_{cm} \end{aligned}$$

Ec. (25)

- Ecuación de Zierold y Palacios: esta ecuación fue planteada específicamente para zonas de México, en función del volumen de la precipitación:

Para lluvias menores de 2,5 cm

$$P_e = p - 0,05 * p^2$$

Ec. (26)

Para lluvias mayores de 2,5 cm

$$Pe = 1,27 * p^{0,75} - 0,0806 * p^{1,5} \quad \text{Ec. (27)}$$

Dónde:

- $Pe$  .....Precipitación efectiva ( $cm/mes$ )
- $p$  .....Precipitación medida ( $cm/mes$ )

- Método de porcentaje fijo de precipitación: La precipitación efectiva se calcula por la ecuación:

$$Pe = (1 - b) * P \quad \text{Ec. (28)}$$

Dónde:

- $b$ .....Fracción fija que representa pérdidas por percolación y escorrentía ( $mm/mes$ )
- $P$ .....Precipitación Total ( $mm/mes$ )

- Método de la Precipitación Fiable: Este método fue desarrollado por la FAO

$$\begin{aligned} Pe &= 0,6 * P - 10 && \text{si } P < 70 \text{ mm.} \\ Pe &= 0,8 * P - 24 && \text{si } P > 70 \text{ mm.} \end{aligned} \quad \text{Ec. (29)}$$

Dónde:

- $P$ .....Precipitación media mensual ( $mm/mes$ )

- Method the Bureau of Reclamation of United States: La precipitación efectiva se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Pe &= P * \left[ \frac{(125 - 0,2 * P)}{125} \right] \\ Pe &= 125 + 0,1 * P \end{aligned} \quad \text{Ec. (30)}$$

Dónde:

–  $P$ .....Precipitación media mensual ( $mm/mes$ )

- Método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos: Este método contempla variables como; la evapotranspiración del cultivo y el déficit de agua en el suelo antes de regar.

$$Pe = f(DAS) * [1,25 * p^{0,824} - 2,93] * 10^{0,000955*ET}$$
$$f(DAS) = 0,53 + 0,0116 * DAS - 8,94 * 10^{-5} * DAS^2 + 2,32 * 10^{-7} * DAS^3$$

Ec. (31)

Dónde:

- $ET$ .....Evapotranspiración potencial mensual ( $mm/mes$ )
- $DAS$ .....Déficit de agua en el suelo ( $mm$ )

## b) Evapotranspiración

Monsalve (1999) conceptualiza la evapotranspiración como un proceso que engloba a la transpiración de la vegetación y la evaporación mediante el cual es posible la transferencia de una porción de agua en forma de vapor desde el suelo.

### 1º Procesos

#### — Evaporación:

Customer citado por Santos (1997) refiere a la evaporación como un fenómeno físico y dinámico del ciclo hidrológico, mediante el cual todo tipo de agua en la superficie esta sujeta a pasar de estado liquido a gaseoso regresando directamente a la atmosfera en forma de vapor.

#### — Transpiración

Es el resultado del proceso físico – biológico, mediante el cual se vaporiza el agua contenida en la planta para que posteriormente retorne a la

atmósfera. Incorpora las pérdidas en forma de goteo o exudación (Custodio y Llamas, 2001).

2º Tipo de Evapotranspiración: Asimismo Monsalve (1999) define la evapotranspiración potencial y real de la siguiente manera:

— Evapotranspiración Potencial

Pérdida máxima de agua en un área específica que se originaría por la evaporación y transpiración de un cultivo que en todo momento cuenta con la humedad suficiente para su uso, es decir, no existe restricción alguna en el suministro de agua ya que el suelo se encontraría a capacidad de campo (Monsalve, 1999).

— Evapotranspiración Real

Representa la cantidad de agua que efectivamente ha perdido una superficie bajo condiciones atmosféricas, grado de cobertura vegetal, naturaleza edáfica y niveles de humedad del suelo real y existente del medio a consecuencia de fenómenos de la evaporación y transpiración de las plantas. Por lo general esta cantidad suele ser menor que la evapotranspiración potencial (Monsalve, 1999).

3º Factores que influyen directamente en la evapotranspiración: son tres los factores decisivos en la evapotranspiración

— Clima: Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, humedad relativa, velocidad del viento pero esencialmente la temperatura (Monsalve, 1999).

— Suelo: Influye respecto al volumen de agua que puede almacenar. Depende de la condición que presente; a capacidad de campo cuando puede ceder agua con facilidad tanto a la atmósfera como a la planta, o punto de marchitez permanente cuando el agua es retenida con mucha

fuerza por las partículas del suelo, dificultando su salida y por ende la evapotranspiración (Monsalve, 1999).

— Cobertura Vegetal: Influye directamente el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo que presente la especie, número de estomas por unidad de superficie y la profundidad radicular (Monsalve, 1999).

4º Métodos para calcular la evapotranspiración: Para efectos de cálculo de la evapotranspiración real es requisito indispensable el cálculo de la evapotrasnpiracion potencial, la cual se calcula a partir de los siguientes metodos (Valverde, 2007)

— Método para calcular ETP Cultivo

$$ET(cultivo) = ET_0 * Kc$$

Ec. (32)

Dónde:

- $ET_0$ .....Evapotranspiración potencial (*mm/mes*)
- $Kc$ .....Coeficiente de cultivo (*adimensional*)

— Coeficiente de Cultivo (kc)

Es un valor desarrollado para un cultivo específico en base al estado fenológico, etapa de desarrollo, características del cultivo, fecha de plantación y condiciones climáticas. Este coeficiente se utiliza para corregir la evapotranspiración de referencia (Allen et al.2006)

— Métodos para calcular ETP Potencial

- Métodos Directos o Analíticos: basados en el establecimiento de balances hídricos
  - Método del lisímetro: Consiste en la estimacion de la evapotranspiracion haciendo uso de lisímetros de drenaje. Calcula la

evapotranspiración en base a la pérdida de agua de un tanque que recrea las condiciones iniciales, esta técnica permite estimar datos directos de la evapotranspiración en tiempo cortos, pero su alto costo y las dificultades para reconstruir las condiciones del suelo en el tanque conllevan a un margen de error.

- Evapotranspirómetro de Thornthwaite: determina de forma directa la evapotranspiración del cultivo apartir del empleo de un tanque de medidas estandarizadas el cual es llenado con tierra y cultivo propio del lugar de estudio.
- Método Gravimétrico: calcula el consumo de humedad en base a las diferencias registradas antes y despues de cada riego de las muestras de suelo analizadas en laboratorio. Esta es una técnica práctica, económica y por ende muy empleada.

$$P_s = \frac{PSH - PSS}{PSS} * 100$$

Ec. (33)

Dónde:

- $P_s$ .....Porcentaje de Humedad de la Muestra
- $PSH$ .....Peso de suelo húmedo ( $g$ )
- $PSS$ .....Peso de suelo seco ( $g$ )

El  $P_s$  se puede expresar en lámina tomando en cuenta los siguientes aspectos:

$$L = P_s * Pap * Pr$$

Ec. (34)

Dónde:

- $L$  .....Lámina de agua ( $cm$ )
- $P_s$ .....Porcentaje de Humedad de la Muestra
- $Pap$ .....Peso específico aparente ( $g/cm^3$ )
- $Pr$ .....Profundidad del muestreo ( $cm$ )

Finalmente la diferencia entre mediciones consecutivas, establece el consumo de agua (CA), la suma de todas las diferencias durante el ciclo del cultivo establece la evapotranspiración.

$$CA = L_2 - L_1 \quad \text{Ec. (35)}$$

Dónde:

- $L_2$ .....Lámina o contenido de humedad de dos a tres días después del primer riego (*cm*)
- $L_1$ .....Lámina o contenido medida antes de aplicar el segundo riego (*cm*)

- Métodos Indirectos o Empíricos: basados en la relación local entre la medida de la evapotranspiración y las condiciones climáticas.

- Tanque evaporímetro o estándar: Consiste en el uso de datos del nivel de agua evaporada obtenidos a partir de la simulación en un tanque estándar que integra los efectos de todos los factores climáticos tales como; temperatura, humedad, velocidad del viento y luz solar con el fin de recabar información precisa.

$$ET_0 = Ev * C \quad \text{Ec. (36)}$$

Dónde:

- $ET_0$ .....Evapotranspiración potencial (*mm/día*)
- $Ev$ .....Evaporación del Tanque (*mm/día*)
- $C$ .....Coeficiente del Tanque (*adimensional*)

- Métodos Teóricos: basados en los procesos físicos de la evapotranspiración.

- Blaney - Criddle: Este método toma en cuenta además de la temperatura, el tipo de cultivo, duración del ciclo vegetativo, temporada de siembra y la zona.

$$ETP = k * p * (0,46T_a + 8,13)$$

Ec. (37)

Dónde:

- $k$  ..... Coeficiente de uso consuntivo mensual, depende del tipo de vegetación, ubicación y etapa de desarrollo  
(*adimensional*)
  - $p$  ..... Porcentaje de horas de sol del mes
  - $T_a$  ..... Temperatura media mensual (°C)
- Penman - Monteith: Es una de las formulás que logra resultados de mayor precision, su limitación radica en el difícil acceso a información climatológica.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Ec. (38)

Dónde:

- $ET_o$  ..... Evapotranspiración de referencia (*mm/día*)
- $R_n$  ..... Radiación neta en la superficie del cultivo (*mm/día*)
- $G$  ..... Flujo de calor del suelo (*MJ/m<sup>2</sup> \* día*)
- $T$  ..... Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- $u_2$  ..... Velocidad del viento a 2 m de altura (*m/s*)
- $e_s$  ..... Presión de vapor de saturación (*KPa*)
- $e_a$  ..... Presión real de vapor (*KPa*)
- $e_s - e_a$  ..... Déficit de presión de vapor (*KPa*)
- $\Delta$  ..... Pendiente de la curva de presión a vapor (*KPa/°C*)
- $\gamma$  ..... Constante psicrométrica (*KPa/°C*)

- Hargreaves: Método diseñado específicamente para la región sudamericana, es una de las fórmulas más prácticas y confiables.

$$ETP = 0.0075 * TMF * RSM$$

Ec. (39)

Dónde:

- *TMF*.....Temperatura media mensual (°F)
- *RSM*.....Radiación Solar incidente mensual.

## B. Suelo

Hillel (1971) manifiesta que el suelo es un sistema heterogéneo, polifásico y de amplias características que hacen posible el fenómeno de la recarga hídrica.

### a) Propiedades

#### 1º Textura y Estructura

La textura es la proporción relativa en la que se presentan los diversos materiales sólidos que componen el suelo, representada por el porcentaje de arena, limo y arcilla, mientras que la estructura es entendida como el ordenamiento de estos materiales en las condiciones naturales de un determinado suelo (Sandoval, 1989).

La textura y estructura dependen del tamaño y forma de las partículas, de acuerdo a estos factores, el suelo está expuesto a pérdidas originadas por la erosión hídrica; como la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua. La textura también afecta la tasa de infiltración del agua así como la cantidad de escorrentía superficial (Custodio y Llamas, 2001).

#### — Métodos para Determinar Clases Texturales del Suelo

- Método de la Pipeta: También denominado “Pipeta de Robinson”, en este método un parte de la muestra es pipeteada a una profundidad e intervalo de tiempo establecido en los procedimientos generales, posteriormente el contenido es secado en un horno para determinar su peso. Se basa en el principio de Stokes y para su aplicación requiere la remoción de materia orgánica y sales solubles demandando mayor tiempo

pero asegurando los datos más exactos en comparación con otros métodos.

- Método del Densímetro de Bouyoucos: Este método permite determinar la textura del suelo basado en la ecuación de Stokes, permitiendo calcular la cantidad de sólido en suspensión a determinados intervalos de tiempo haciendo usos de un hidrómetro flotante. Los resultados obtenidos son de alta confiabilidad y no requiere tratamiento preliminar de las muestras.

$$LC = [(T_{muestra} - T_{hidrómetro})0,18] + Lectura_{leida}$$

$$\% limos + \% arcillas = \frac{1ra LC}{g.Muestra} * 100$$

$$\% arcillas = \frac{2da LC}{g.Muestra} * 100$$

$$\% limos = (\% limos + \% arcillas - \% arcillas)$$

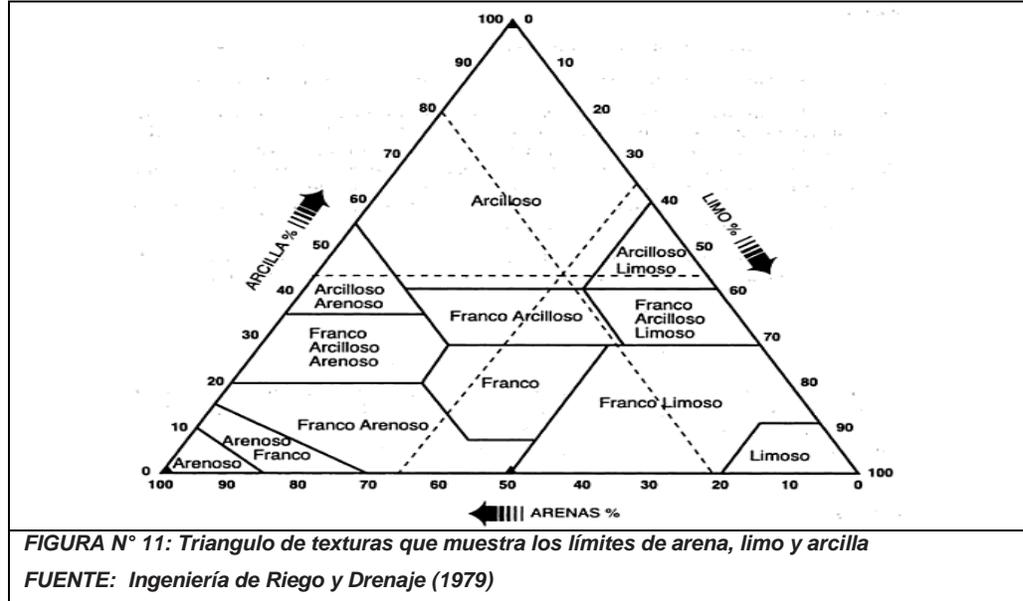
$$\% arenas = [100 - (\% limos + \% arcillas)]$$

Ec. (40)

Dónde:

- $LC$  .....Lectura Corregida
- $T_{muestra}$ .....Temperatura de la muestra
- $T_{hidrómetro}$ .....Temperatura del hidrómetro (20°F)
- $g.Muestra$  .....Peso de la muestra ( $g$ )

- Método del Tacto: Método de gran uso en campo ya que solo requiere humedecer el suelo y destreza del profesional, su aplicación sirve de referencia para dar aproximaciones de la clase textural a la que pertenece el tipo de muestra.



## 2º Densidad Aparente

Padilla (2003) hace referencia a la relación existente entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por el sólido y el espacio poroso, normalmente el material sólido que compone un suelo tiene una densidad real del orden de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , pero el volumen que ocupa realmente en el terreno es mucho mayor debido a la cantidad de poros del suelo, los cuales están llenos de aire o de agua.

La densidad aparente depende básicamente de la textura del suelo, pero puede ser modificada por la compactación. Al realizar esta actividad se reduce el volumen del espacio poroso y por ende aumenta la densidad aparente del suelo (Sandoval, 1989).

— Métodos para Calcular la Densidad Aparente: entre los métodos múltiples métodos Núñez (2006) destaca:

- Método de Campo: esta técnica requiere tomar el peso del suelo de un hoyo cavado previamente. Se recolecta una muestra para determinar el contenido de humedad y transformar el peso total en peso seco,

posteriormente se determina el volumen del hoyo mediante el llenado de agua. Finalmente con los datos obtenidos se aplica la siguiente ecuación.

$$Dap = \frac{100 psh}{Vp(100 - pss)} \quad \text{Ec. (41)}$$

Dónde:

- $Vp$  .....Volumen del hoyo muestreado ( $m^3$ )
- $psh$  .....Peso del suelo húmedo ( $g$ )
- $pss$ .....Porcentaje de Humedad suelo seco

- Método del Balón: es una variante más tecnificada que el anterior método. Aquí se determina el volumen excavado con un medidor volumétrico que se adapta por la presión generada al interior del pozo.
- Método del Cilindro: Implica trabajo de laboratorio, ya que según este método se debe pesar en seco con una balanza de cuatro dígitos de exactitud una muestra de suelo tomada con un cilindro graduado en campo y proceder a la aplicación de la siguiente fórmula.

$$Dap = \frac{\text{Peso suelo (g)}}{\text{Volumen del suelo (cm}^3\text{)}} \quad \text{Ec. (42)}$$

Dónde:

- $Dap$ .....Densidad Aparente ( $g/cm^3$ )

### 3º Grado de Saturación

Sanz (1975) declara que el grado de saturación es el volumen de agua presente en los poros del suelo. Asimismo Custodio y Llamas (2001) manifiestan la existencia de múltiples formas en las que se encuentra presente el agua en el suelo entre las que mencionan a las aguas retenidas por fuerzas no capilares, aguas retenidas por fuerzas capilares y agua retenidas en el suelo.

Para llevar a cabo el balance hídrico, el grado de saturación es un parámetro muy importante a considerar, ya que se establece una relación inversamente proporcional entre la capacidad de los suelos de retener el agua y la infiltración que recarga los estratos inferiores. Es por ello que resulta necesaria la determinación de las constantes de humedad, las cuales Sandoval (1989) define de la siguiente manera:

— Capacidad de Campo (*CC*): Esta constante está influenciada por la textura y contenido de materia orgánica que presenta el suelo. Se considera como el límite superior de agua aprovechable o disponible para el desarrollo de las plantas, pues al perder el agua drenada por la gravedad, concentra el máximo contenido de humedad que un suelo puede retener para el aprovechamiento por la zona radicular (Sandoval, 1989).

La fórmula empleada para calcular la capacidad de campo (*CC*) es la siguiente:

$$CC = \frac{psh - pss}{pss} * 100$$

Ec. (43)

Dónde:

- *psh*.....Peso suelo húmedo (*g*)
- *pss* .....Peso suelo seco (*g*)

— Punto de Marchitez Permanente (*PMP*): Se define como el límite inferior de humedad aprovechable para las plantas debido a la fuerte retención del agua por el terreno, ya que por debajo de este umbral la tasa de absorción de agua por parte de las raíces es tan lenta e insuficiente para satisfacer los requerimientos de transpiración que resulta limitante para la sobrevivencia de las plantas (Sandoval, 1989).

Para efectos del cálculo del valor del Punto de marchitez (*PMP*) permanente se aplica la siguiente fórmula:

$$\% PMP = \frac{psh - pss}{pss} * 100$$

Ec. (44)

Dónde:

- *psh* .....Peso suelo húmedo (*g*)
- *pss*.....Peso suelo seco (*g*)

— Agua utilizable por las plantas (Humedad Aprovechable): Es representada como el agua capilar, es decir la fracción de agua que puede ser aprovechada por la zona radicular de las plantas sin que estas ejerzan mayor esfuerzo. Se determina mediante la diferencia entre el agua a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Sandoval, 1989).

$$\% H = CC - PMP$$

Ec. (45)

Dónde:

- *CC*.....Capacidad de Campo (%)
- *PMP*.....Punto de Marchitez Permanente (%)

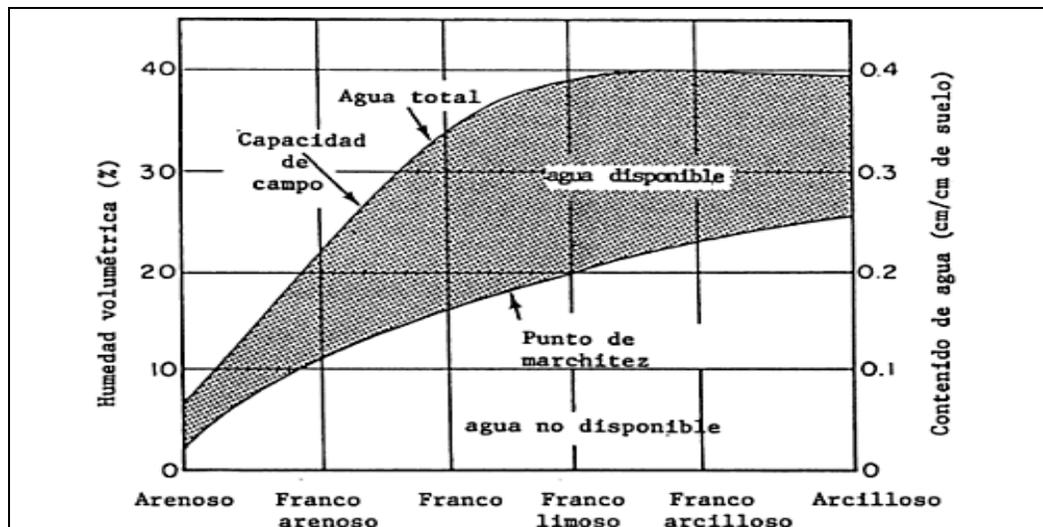


FIGURA N° 12: Variación de la capacidad máxima de retención de agua para diferentes tipos de suelo

FUENTE: Kramer (1983)

#### 4º Infiltración

Pulido (2014) sostiene que es un proceso de entrada de agua en el suelo en un cierto tiempo teniendo como punto de partida la superficie, ocupando total o parcialmente los poros del suelo hasta incursionar en sus capas inferiores saturadas para alcanzar un nivel freático e incrementar el volumen acumulado anteriormente por efecto de las fuerzas gravitacional y capilar.

De igual manera, manifiesta que los principales factores que afectan la capacidad de infiltración son las características físicas- químicas del suelo, la vegetación, las características de la lluvia, la topografía del terreno, la estratificación y la temperatura del agua y el suelo.

— Métodos Directos: dentro de estos métodos destacan la utilización de:

- Infiltrómetros: Permiten calcular la capacidad de infiltración en áreas poco extensas, para ello es necesario agregar artificialmente agua en el terreno.

- Infiltrómetro tipo inundador:

La capacidad de infiltración es deducida a partir del volumen de agua que es necesario agregar para mantener un tirante constante sobre el área, procurando que se aproxime a lo que se obtiene durante una tormenta o riego. Las principales desventajas de este método es que no reproducen la compactación ejercida por lluvias y para su aplicación requiere necesariamente alterar la estructura del suelo.

- Infiltrómetro tipo simulador:

Se fundamenta en la aplicación de agua mediante un sistema tipo aspersión o goteo que reproduzca el efecto de las precipitaciones sobre el terreno, de esta manera permite el estudio de la escorrentía e infiltración en condiciones muy próximas a las naturales.

- Lisímetros: Consiste en un depósito relleno con el tipo de suelo en estudio, está expuesto a agentes atmosféricos y recibe las precipitaciones naturales. El agua drenada es medida al igual que la humedad y temperatura del suelo a diferentes profundidades. Las limitaciones de este método radica en la dificultad de reconstruir el suelo y el requerimiento de periodos largos de tiempo.
- Método de Porchet: Es uno de los métodos más precisos y con facilidad de aplicación en el campo, también es conocido como el de cilindro excavado en el suelo o cilindro invertido. Consiste en cavar un hoyo e introducir un cilindro de radio y altura conocida para saturarlo de agua y hacer mediciones en intervalos de tiempo.

$$fc = \left( \frac{R}{2} (t_2 - t_1) \right) * \ln \left( \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \right)$$

Ec. (46)

Dónde:

- $fc$ .....Infiltración básica ( $mm/día$ )
- $R$  .....Radio del cilindro ( $mm$ )
- $h_x$ .....Altura ( $mm$ )
- $t_x$ .....Tiempo ( $día$ )

— Métodos Indirectos: se determina la capacidad de infiltración considerando una cuenca perfectamente controlada, con datos precisos de precipitación, evaporación y escorrentía.

- Balance Hídrico: Permite medir el fenómeno real de la infiltración en cuencas de una extensión máxima de 1 000 Ha, en las que se pueden considerar continuas las variables que afectan la capacidad de infiltración. Posteriormente se aplica la siguiente fórmula:

$$P = Es + I + ETP + Int$$

Ec. (47)

Dónde:

- $P$ .....Precipitación ( $mm$ )
- $Es$  .....Esguerrimiento superficial ( $mm$ )
- $I$ .....Infiltración ( $mm$ )
- $ETP$ .....Evapotranspiración ( $mm$ )
- $Int$ .....Intercepción ( $mm$ )

— Fórmulas Empíricas: son fórmulas que expresan el fenómeno de infiltración matemáticamente

- Fórmula de Kostiakov:

$$L = b * T^m$$

Ec. (48)

Dónde:

- $L$ .....Infiltración acumulada ( $mm$ )
- $T$  .....Tiempo de permanencia del agua en el suelo.
- $b$  y  $m$ .....Constantes

### C. Relieve

Determinada por la pendiente del terreno, el cual constituye un factor muy importante en el proceso de infiltración, estableciéndose una relación directamente proporcional entre el tiempo de contacto del agua y la superficie. Es por ello que en las pendientes muy accidentadas el agua cae y debido a la inclinación del terreno se desplaza a mayor velocidad, propiciando pérdidas de agua por escorrentía superficial, a diferencia de las pendientes suaves o moderadas, las cuales retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración y por ende el proceso de recarga hídrica (Padilla, 2003).

### D. Estratigrafía Geológica

La necesidad de conocer la disposición o secuencia de los diversos materiales geológicos del área de estudio reside en las condiciones favorables que éstos

puedan presentar para ser considerados zonas idóneas para almacenar flujos subterráneos de agua. Estas condiciones obedecen procesos evolutivos que han ido modificado las características iniciales de porosidad y permeabilidad por acción de fuerzas de compresión y tensión, haciéndolas más aptas o poco favorables para permitir el paso del agua a mayor profundidad y constituirse como acuíferos (Herrera, 2002).

La naturaleza y la distribución de los acuíferos en un sistema geológico son controladas por la litología, estratigrafía, la estructura de los depósitos geológicos y sus formaciones, siendo indispensable el conocimiento de estos factores para una comprensión de la distribución de los acuíferos. (House of Water and Environment, 2004).

a) Influencia de la estratigrafía y la estructura en la composición de acuíferos (House of Water and Environment, 2004).

1º Acuíferos de Arenisca: emergen lentamente en la zona de afloramiento lo largo del frente de la montaña.

2º Acuíferos de Arena y Grava: se extienden desde las tierras altas de regiones intermontañas.

3º Acuíferos de Fallas y Pliegues en la Región Desértica: Los cuerpos de agua superficial reflejan características estructurales.

En terrenos que han sido deformados por pliegues y fallas, los acuíferos pueden ser difíciles de discernir por la complejidad geológica. En estas situaciones el factor principal en la investigación de las aguas subterráneas es a menudo el análisis estructural a gran escala de la configuración geológica (House of Water and Environment, 2004).

b) Prevalencia de rocas que determinan la presencia de acuíferos

Asimismo, se manifiesta que son cuatro tipos de rocas característicos que forman parte de la composición de más del 80% de acuíferos. De igual manera limonitas, rocas metamórficas y rocas plutónicas son parte de la estratigrafía de un acuitardo (House of Water and Environment, 2004)

1º Arenas no consolidadas y gravas: Debido a que estas rocas presentan poca cantidad de material cementante la porosidad de arenas no consolidadas y gravas es muy alta, disponiendo de grandes espacios en los que se almacenan fluidos como el agua (House of Water and Environment, 2004).

2º Areniscas: También denominada psamita; es una roca sedimentaria de tipo detrítico, son las rocas sedimentarias más comunes en la corteza terrestre. Las areniscas contienen espacios intersticiales entre sus granos los cuales pueden estar llenos de agua (House of Water and Environment, 2004).

3º Calizas: Es una roca del tipo sedimentaria compuesta principalmente por carbonatos de calcio y magnesio. Debido a su gran porosidad tiene la capacidad de almacenar flujos subterráneos de agua (House of Water and Environment, 2004).

4º Flujos de lava basáltica: derivados de erupciones volcánicas, es la composición ígnea de mayor predominancia en el planeta. A pesar de su carácter inicial de impermeabilidad es fácilmente facturable por lo que se constituye como un material apto para almacenar agua (House of Water and Environment, 2004).

### **E. Cobertura Vegetal**

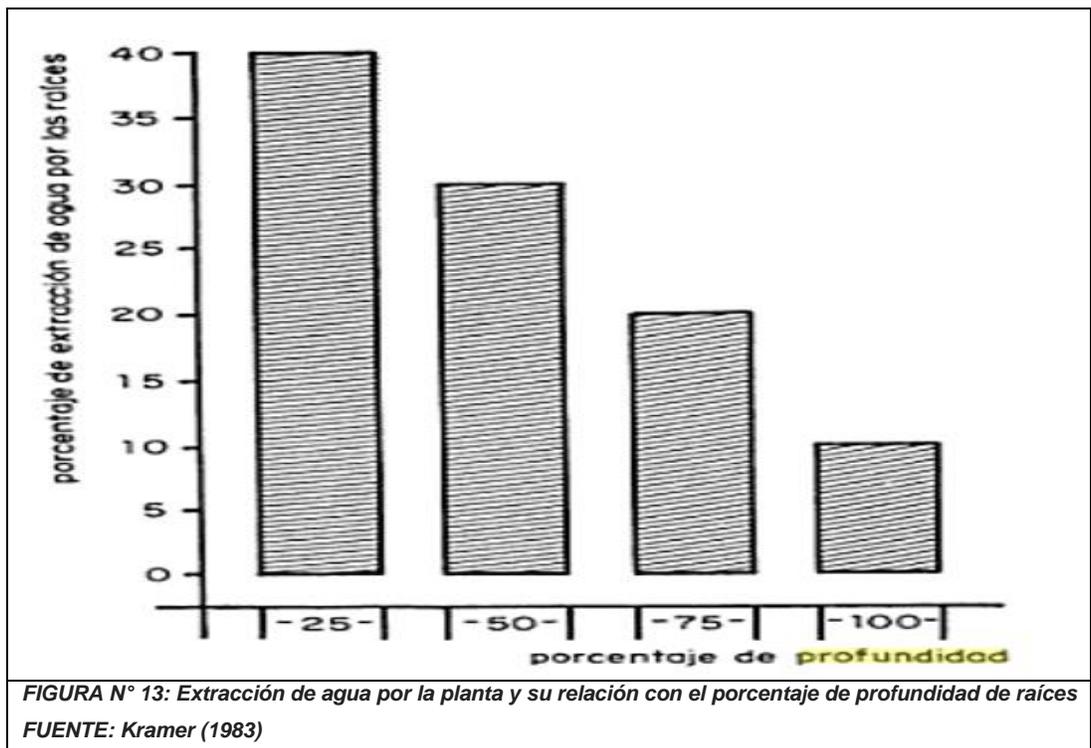
La presencia de cobertura vegetal disminuye el impacto de las precipitaciones, evitando que se produzca la formación de capas finas e impermeables de

sedimentos que compactan la superficie conocidas como costras, de igual manera disminuye el volumen y la velocidad de agua que se pierde por la escorrentía ya que las raíces agrietan el suelo permitiendo mayor infiltración (Gliessman, 2002).

Los dos aspectos mediante los cuales participa la cobertura vegetal son los siguientes:

a) Profundidad Radicular

Este factor determina la humedad utilizable por la vegetación, obedece al tipo de especie vegetal, condiciones del suelo, patrón de clima y penetración del agua. En la mayoría cultivos, la zona radicular presente a una profundidad de 30 cm es la que absorbe agua, sin embargo en bosques y cultivos permanentes frutales u otros las raíces pueden alcanzar una profundidad mayor a la de un metro. Al incrementarse la profundidad radicular, se aumenta también el rango de agua edáfica que puede ser aprovechada por la vegetación existente (Padilla, 2003).



## b) Intercepción

Shaw (1996) manifiesta que es proceso mediante el cual una fracción de las precipitaciones es retenida temporalmente por el dosel arbóreo restringiendo así el paso del agua que llega al suelo, el volumen de precipitación interceptada depende en gran medida del tipo y densidad de la cubierta vegetal.

La retención temporal de la precipitación por la cubierta vegetal, posteriormente es redistribuida de tres maneras; la primera hace referencia a una infiltración a través del follaje o también denominada lluvia bajo dosel, es aquella porción de la precipitación que logra alcanzar el suelo a través de las copas o mediante el goteo de hojas y ramas; la segunda consiste en el escurrimiento fustal, es decir el agua escurre por las ramas y hojas hasta el tronco principal y luego escurre por su superficie hasta alcanzar el suelo; finalmente una parte del agua retenida por la planta retorna a la atmósfera por evaporación, produciéndose así la pérdida por intercepción (Ward y Robinson, 1989).

De acuerdo a Nittler y Barahona (1993) los bosques generalmente son capaces de interceptar más agua que otras coberturas vegetales, en tal sentido señalan que en los bosques húmedos tropicales la intercepción puede representar hasta un 30 % de la precipitación, las zonas con cobertura de pastizales y arbustos presentan una retención que oscila entre 10 % y 20 %, mientras que en zonas áridas y de menor cobertura esta pérdida es mínima.

No obstante una determinada cantidad de precipitación sobre la misma cobertura puede causar diferentes niveles de intercepción, ya que un solo evento o pocos eventos consecutivos pueden producir menor pérdida a comparación de varios eventos con pausas suficientemente largas como

para que la cobertura se vuelva a secar. Por ende, ver la importancia de la interceptación resulta bastante sencillo, pero su medición es compleja, dado las variaciones de cobertura, condiciones climáticas y físicas de la cuenca (Nittler y Barahona, 1993).

## **F. Escorrentía**

Fracción de las precipitaciones que al exceder la capacidad de infiltración del suelo, discurre desde la superficie terrestre hasta confluir en el cauce de arroyos, ríos, lagos y océanos, estableciéndose así una relación directamente proporcional entre la cantidad de agua de escorrentía y la distancia de la red de drenaje, dicho volumen se ve favorecido aún más por la existencia de pendientes accidentadas (Orozco, Padilla y Salguero, 2003).

### a) Tipos de Escorrentía

Linsley (1988), considera que la escorrentía puede clasificarse de tres maneras:

#### 1º Escorrentía Superficial

Nittler y Barahona (1993) expresan que es el exceso de agua que no se infiltra ni se evapora y circula con gran velocidad por la superficie de la tierra dando lugar a la formación de barrancos, arroyos y ríos.

#### 2º Escorrentía Subsuperficial

Fracción de agua infiltrada que se moviliza a través de los horizontes superiores del suelo, misma que no llega a formar parte de flujos subterráneos debido a la obstaculización por la presencia de una capa confinante que se lo impide y la convierte en agua sub superficial. A pesar de la baja movilidad que presentan estas aguas, el volumen que forma parte de la escorrentía subsuperficial es mayor que la escorrentía superficial. (Linsley, 1998)

### 3º Escorrentía Subterránea

Es el proceso de infiltración y posterior percolación a través del cual se da lugar a flujos de agua subterránea, los mismos que recargan acuíferos o afloran en fuentes y manantiales dando lugar a la formación de arroyos y ríos, constituyendo de esta manera el caudal base de los ríos (Padilla, 2003).

#### b) Factores que afectan la escorrentía

Núñez (2001) refiere que los factores que afectan al escurrimiento están influenciados por la naturaleza de las precipitaciones y la fisiografía del terreno.

1º Precipitaciones: es el elemento climático del cual depende el escurrimiento y está influenciado por tres aspectos principales:

— Intensidad: La precipitación debe presentar tal intensidad que pueda rebasar la capacidad de infiltración del suelo para que de esta manera se origine el escurrimiento superficial.

— Duración: Independientemente de la intensidad de una lluvia, si ésta es de prolongada duración propiciará mayor escurrimiento superficial.

— Distribución: generalmente en cuencas de reducida extensión, los mayores escurrimientos superficiales serán producto de tormentas, contrariamente las lluvias poco intensas abarcarán cuencas de grandes áreas.

2º Fisiografía del Terreno: Obedece a las características físicas del terreno y la red de drenaje de la cuenca.

— Geología: la permeabilidad de la estructura geológica del terreno condiciona el escurrimiento.

— Topografía y Pendiente: La presencia de depresiones y ondulaciones originan que las lluvias se acumulen disminuyendo la cantidad de agua

destinada al escurrimiento. Sin embargo la existencia de pendientes altas favorecen el escurrimiento ya que el tiempo de contacto entre suelo- agua es mínimo.

— Red de Drenaje: mientras la red de distribución fluvial esté a distancias mayores, el escurrimiento será mayor.

## CAPÍTULO III

### PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

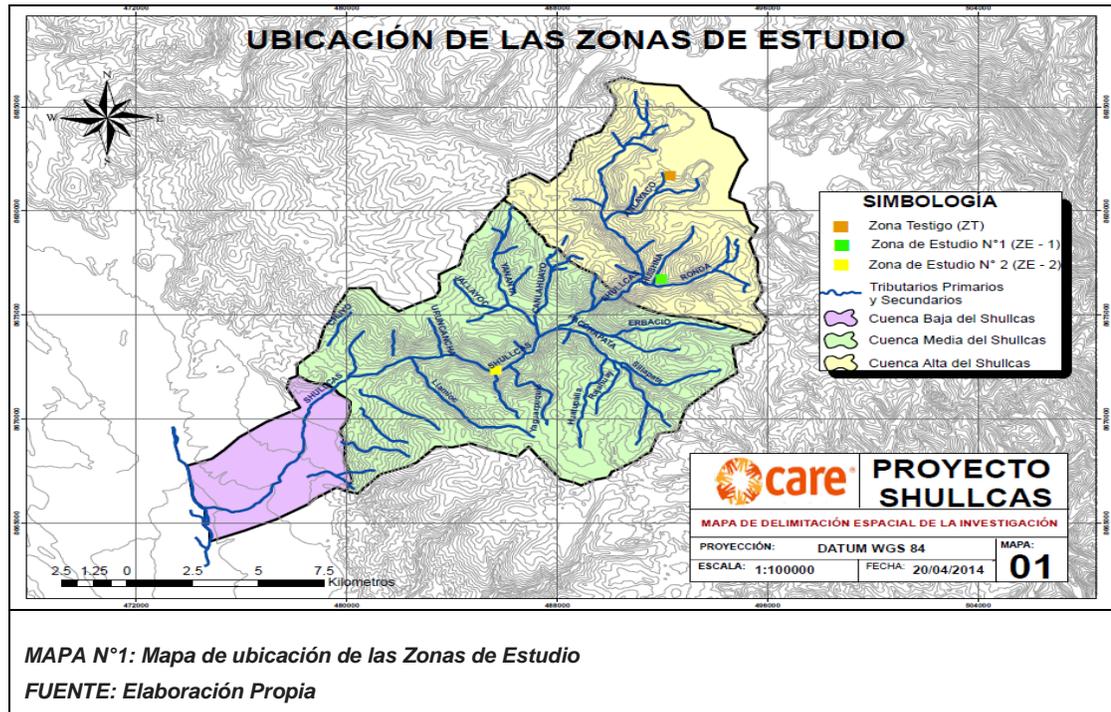
#### 3.1 Metodología

##### 3.1.1 Método

##### 3.1.1.1 Delimitación de las Zonas de Estudio

A. Se identificó las zonas que habían sido reforestadas en la subcuenca del río Shullcas con la especie en estudio (*Polylepis Racemosa*), realizado en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA).

<i>TABLA N° 15: Georeferenciación de las Zonas de Estudio</i>				
ZONA DE ESTUDIO	DENOMINACIÓN	COORDENADAS UTM		ALTITUD m.s.n.m.
		N	E	
Zona Testigo	ZT	8681672	492304	4703
Zona de Estudio N° 1	ZE – 1	8676745	491987	4351
Zona de Estudio N° 2	ZE – 2	8672348	485674	3718



B. Empleando el muestreo No Probabilístico por Conveniencia se determinó tres parcelas de una extensión de 20 m x 20 m., considerando una zona testigo (sin la presencia de cobertura vegetal), una zona de plantaciones jóvenes y finalmente una parcela de plantaciones adultas de *Polylepis Racemosa* (Quinual).

C. Así mismo, las zonas de estudio fueron delimitadas y georeferenciadas recabando datos de altitud, coordenadas UTM y la pendiente de cada sector.

### 3.1.1.2 Caracterización de las Zonas de Estudio

A. Utilizando el método de observación y descripción en cada zona de estudio delimitada con anterioridad y haciendo uso de las fichas de campo se realizó un inventario de las especies arbustivas presentes para lo cual se consideró en la descripción factores tales como; edad, estado fenológico y la altura de cada plantío.



B. Posteriormente en base al inventario elaborado se determinó el número total de plantaciones de Quinual y su porcentaje de cobertura frente a otras especies en la zona delimitada para ratificar la representatividad de la especie en estudio.

### 3.1.1.3 Caracterización del Factor Suelo.

A. Para llevar a cabo la caracterización del perfil del suelo se empleó la técnica de la calicata. Las dimensiones consideradas para su realización fue de 1,20 m. x 0,70 m. y una profundidad variable que estuvo sujeta al hallazgo de la roca madre.

B. Culminada la calicata se procedió a identificar y medir la altura de cada horizonte visualizado así como la profundidad total alcanzada por la calicata.

C. Finalmente el trabajo de caracterización concluyó con la toma de muestras para la determinación de las siguientes variables; granulometría, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en laboratorio.

### 3.1.1.4 Determinación de la Infiltración básica del Suelo

El cálculo de esta variable se efectuó *in situ* para lo cual se utilizó el Método de Porchet, que consiste en la introducción de un cilindro con altura y radio conocido; (para esta investigación se utilizó las siguientes dimensiones; 1,10 m y 0,60 m respectivamente por tratarse de especies arbustivas) a una profundidad de 20 cm como máximo. Finalmente se adicionó un volumen

aproximado de 0,50 m<sup>3</sup> de agua y se procedió a lecturar la diferencia de alturas de la columna de agua en lapsos de tiempo.

Finalmente, la (*f<sub>c</sub>*) se determina reemplazando los datos obtenidos en la ecuación N° 46

### 3.1.1.5 Recopilación de Datos Meteorológicos

Para el desarrollo de esta investigación se solicitó datos meteorológicos correspondientes al año hidrológico Julio 2013 - Junio 2014 al SENAMHI, de las estaciones que se encuentran en el ámbito de influencia de las zonas de estudio.

**TABLA N° 16: Datos geográficos de las estaciones meteorológicas**  
**FUENTE: SENAMHI (2014)**

ESTACIÓN	LATITUD S	LONGITUD W	ALTITUD m.s.n.m
Estación Meteorológica Lazo Huntay	11° 55´	75° 04´	4684
Estación Meteorológica Acopalca	11° 55´ 38,52´´	75° 06´ 58,5´´	3839



**MAPA N°2: Mapa de ubicación de las Estaciones del SENAMHI**

**FUENTE: Elaboración Propia**

### **3.1.1.6 Procesamiento de Información**

Con la información obtenida preliminarmente se procedió a realizar el respectivo análisis y procesamiento de datos e información con la finalidad de obtener las variables que intervienen y se relacionan en el proceso de recarga hídrica determinada a través del Método de Balance Hídrico de Suelos propuesto por Schosinsky (Schosinsky, 2006).

#### **A. Cálculo de la Fracción de Lluvia interceptada por el Follaje (*Ret*)**

Ésta variable hace referencia a la cantidad de lluvia que no precipita al suelo ya que es retenida por el follaje. Se determina aplicando la ecuación N° 9.

#### **B. Determinación de la Fracción que Infiltra por la Textura del Suelo (*kfc*)**

Considera la fracción de lluvia que es capaz de infiltrar por efecto de la textura que presenta un determinado suelo. Su cálculo se efectúa mediante la ecuación N° 10.

#### **C. Determinación de la Fracción que Infiltra por el Efecto de la Pendiente (*kp*)**

Estima la porción de precipitación que infiltra gracias al tiempo de contacto entre la superficie y la precipitación. Se determina mediante la georeferenciación de los vértices de cada zona de estudio y su posterior comparación con los valores de la Tabla N° 10.

#### **D. Determinación de la Fracción que Infiltra por el Efecto de la Cobertura Vegetal (*kv*)**

Representa la fracción de lluvia que llega a infiltrar por acción de la presencia de cubierta vegetal presente en cada zona de estudio. Su determinación está sujeta a los valores predeterminados en la Tabla N° 11

#### **E. Cálculo del Coeficiente de Infiltración del Suelo (*Ci*)**

Contempla la infiltración que se produce por efecto de la textura del suelo sumando a ello la que se produce por causa de la pendiente y finalmente toma

en cuenta la fracción de lluvia que infiltra por acción de la cobertura vegetal presente. Su cálculo se efectúa mediante la aplicación de la ecuación N° 11.

#### **F. Cálculo de la Precipitación Efectiva ( $P_{ef}$ )**

Refiere a la fracción de la precipitación que logra infiltrar en el suelo para que posteriormente recargue los mantos acuíferos. Su determinación se hace mediante la aplicación de la ecuación N° 12.

#### **G. Cálculo de la Evapotranspiración de Cultivo ( $ET_{cultivo}$ )**

Ésta variable expresa la evapotranspiración generada por un cultivo específico, para lo cual interviene el Coeficiente de Cultivo ( $kc$ ) de la especie en estudio (*Polylepis racemosa*). Su determinación se lleva a cabo mediante la aplicación de la ecuación N° 32.

##### a. Coeficiente de Cultivo ( $kc$ )

Para el desarrollo de esta investigación se hizo uso de un Coeficiente de cultivo teórico de *Polylepis* desarrollado por Buytaert y otros (2006). En su estudio “Analysis of the water balance of small paramo catchments in south” se analiza una zona denominada Huagrauma la cual presenta una altitud que oscila de 3690 m.s.n.m. a 4100 m.s.n.m., pendiente mayor a 60 % además de presentar una cobertura compuesta por pasturas naturales y la existencia de plantaciones de *Polylepis*. La conclusión de esta investigación estima que el  $kc$  obtenido es de 0,42; el cual representa un valor realista en vista de las características de la vegetación. Teniendo esas consideraciones en cuenta resultó aplicable hacer uso de ese dato ya que la zona descrita anteriormente comparte características similares a las que presentan las zonas de estudio seleccionadas para el desarrollo de esta investigación, siendo sustancial destacar la presencia de plantaciones de *Polylepis*.

$$Kc = 0.42$$

#### **H. Determinación de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia ( $ET_o$ )**

Para la determinación de esta variable se usó el Software CROPWAT 8.0, herramienta desarrollada por la División de Tierras y Aguas de la FAO. Este método ha sido seleccionado por la FAO como la referencia, ya que incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Sus cálculos se fundamentan en la ecuación de Penman-Monteith N° 38.

#### **I. Determinación del coeficiente de Humedad al final del mes ( $C1$ )**

Si se discrimina la fracción que se pierde por evapotranspiración se determina un coeficiente de humedad inicial a través de la ecuación N° 13.

#### **J. Determinación del Coeficiente de Humedad al final del mes ( $C2$ )**

Este coeficiente contempla la humedad final del mes después de haber ocurrido la evapotranspiración. Se estima mediante la ecuación N° 14.

#### **K. Cálculo de la Evapotranspiración Real Tentativa ( $ETPR$ )**

Se determina a través de la ecuación N° 15.

#### **L. Determinación de la Humedad Disponible ( $HD$ )**

Es la humedad que se encuentra disponible para ser aprovechada por el sistema radicular de las plantas. Se calcula mediante la ecuación N° 16.

#### **M. Cálculo de la Evapotranspiración Real ( $ETR$ )**

Se estima mediante la ecuación N° 17.

#### **N. Humedad Inicial del Suelo ( $HSi$ )**

Para determinar esta variable se seleccionan tres meses consecutivos en el que la precipitación efectiva supere la evapotranspiración de las plantaciones, asignando al mes siguiente de los meses consecutivos seleccionados una humedad inicial igual a la capacidad de campo (Schosinsky y Losilla, 2000).

#### **O. Cálculo de la Humedad del Suelo al final del mes (*HSf*)**

Esta variable es fundamental para el cálculo de la recarga potencial del acuífero, misma que no puede ser mayor a la capacidad de campo del suelo. Se determina mediante la ecuación N° 18.

#### **P. Cálculo de la Escorrentía (*ESC*)**

Cantidad de precipitación que no logra infiltrar, esta fracción resulta mayor si la pendiente es elevada y el grado de cobertura vegetal escaso. Se estima mediante la ecuación N° 19.

#### **Q. Cálculo de la Recarga Potencial del Acuífero (*Rp*)**

El acuífero presentará una recarga si se cumple que la tasa de evapotranspiración, retención por follaje y la escorrentía no superan el valor de la precipitación efectiva la cual infiltra hasta alcanzar los mantos acuíferos. Su determinación se realiza aplicando la ecuación N° 20, en la cual intervienen las distintas variables calculadas previamente.

### **3.1.2 Tipo de la Investigación**

De acuerdo al propósito de la investigación, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas suficientes para ser nominado como una investigación de tipo Aplicada, ya que se caracteriza por la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y las consecuencias prácticas que de ellas deriven (Sánchez y Reyes, 1998).

### **3.1.3 Nivel de la Investigación**

Acorde a la naturaleza del estudio, la investigación es de un nivel Correlacional, porque busca determinar el grado de relación existente entre las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y la recarga hídrica de acuíferos en un momento determinado (Sánchez y Reyes, 1998).

### **3.2 Diseño de la Investigación**

Debido al carácter de la investigación y el objeto en estudio se decidió emplear un diseño No experimental, específicamente un diseño por Bloques completamente al azar o aleatorio para seleccionar una muestra representativa de plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y garantizar la homogeneidad de la muestra, ya que en las zonas determinadas se observa presencia de plantaciones de otras especies que al ser tomadas en cuenta pueden originar una alteración en los resultados del estudio.

### **3.3 Hipótesis de la Investigación**

#### **3.3.1 Hipótesis General**

- Las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) influyen en la recarga hídrica de acuíferos estimada mediante el balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky en la subcuenca del río Shullcas.

#### **3.3.2 Hipótesis Específicas**

- Existe una relación directa entre la recarga potencial de acuíferos y la cantidad de precipitación efectiva en la subcuenca del río Shullcas.
- Existe una relación directa entre la recarga potencial de acuíferos y la evapotranspiración real generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y su medio en la subcuenca del río Shullcas.
- Existe una relación directa entre la recarga potencial de acuíferos y la escorrentía presente en la subcuenca del río Shullcas.

### **3.4 Variables**

#### **3.4.1 Variable Independiente**

X = Plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual)

#### **3.4.2 Variable Dependiente**

Y = Recarga hídrica

### **3.5 Cobertura del Estudio**

#### **3.5.1 Universo**

El universo de la investigación está constituido por la parte alta y media de la Subcuenca del río Shullcas.

#### **3.5.2 Población**

La población en estudio está conformado por una Zona Testigo (sin cobertura vegetal) en la parte alta de la Subcuenca del río Shullcas y el Bosque de *Polylepis racemosa* presente en la parte alta y media de la Subcuenca del río Shullcas.

#### **3.5.3 Muestra**

De la población anteriormente indicada se determinó como muestra 3 parcelas de un área de 20 m x 20 m.

#### **3.5.4 Muestreo**

La muestra se determinó mediante el Muestreo no probabilístico por conveniencia.

### **3.6 Técnicas e Instrumentos**

#### **3.6.1 Técnicas de la Investigación**

En base a los objetivos del proyecto de investigación, para la obtención de información se emplearon las técnicas de:

- Análisis documental.
- Observación de campo.
- Entrevista.

#### **3.6.2 Instrumentos de la Investigación**

De acuerdo a las técnicas seleccionadas para emplear en la investigación, se determinaron como instrumentos a utilizar:

- Fichas de Delimitación de Parcelas e Inventario de Especies.
- Fichas de Medición de la Infiltración.
- Fichas de Caracterización del Suelo.
- Cilindro.
- Bolsas Ziploc.
- Cuerdas de Nylon.
- Estacas de Madera.
- Baldes.
- GPS.
- Pico, Lampa y Barreta.

### **3.7 Procesamiento Estadístico de la Información**

#### **3.7.1 Estadísticos**

- Regresión Lineal

Se utilizó para hallar la ecuación matemática que describa el comportamiento de 2 variables, en este caso una línea recta ( $Y = a_0 + a_1X$ ).

- Correlación Lineal

Se utilizó para hallar la medida en la cual se relacionan 2 variables, a través de: el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

- Promedio

Se utilizó a la media aritmética ( $\bar{X}$ ) como medida de tendencia central de las variables.

- Máximo y Mínimo

Se utilizaron los valores máximos y mínimos de una muestra para analizar la tendencia de su comportamiento en una escala temporal.

### 3.7.2 Representación

- Gráficos de Barras

Se utilizó este tipo de gráficos para comparar las magnitudes de una variables en diferentes categorías, también se utilizó para mostrar la evolución en el tiempo.

- Gráficos de Dispersión

Se utilizó este tipo de gráficos para determinar el grado de correlación entre dos variables.

### 3.7.3 Técnica de Comprobación de la Hipótesis

- Hipótesis Nula

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis Alterna

*H1: al menos una de las medias es diferente*

- Análisis de Varianza de un solo factor

Se utilizó este tipo de ANOVA pues se desea comprobar estadísticamente si las medias de 3 poblaciones (ZT, ZE - 1 y ZE - 2) con niveles diferentes referentes a un solo factor (presencia de *Polylepis Racemosa*); son iguales.

## **CAPÍTULO IV**

# **ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1 Resultados**

#### **4.1.1 Resultados de la Caracterización de las Zonas de Estudio**

##### **4.1.1.1 Zona Testigo (ZT)**

###### **A. Flora**

La zona testigo estuvo caracterizada por ser un terreno carente de cobertura vegetal y especies arbóreas.

###### **B. Fauna**

Al tratarse de una zona carente de cobertura vegetal, la fauna se limitó a la presencia de insectos de tierra tales como lombrices.

### C. Pendiente

TABLA N° 17: Resultado del Cálculo de Pendiente de la Zona Testigo (ZT)				
COORDENADAS UTM		ALTURA (m.s.n.m)	ÁNGULO (GRADOS)	PENDIENTE (%)
N	E			
8681672	492304	4703	15,36	27,5
8681664	492276	4695		

La Tabla N° 17 corresponde a los datos empleados para el cálculo de la pendiente parcial en la Zona Testigo, calculándose una inclinación de aproximadamente 28 %.

#### 4.1.1.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE – 1)

##### A. Flora

En la colina en la que se delimitó esta zona de estudio se observó la presencia masiva de pastos naturales predominando la *Festuca*, *Calamagrostis*, *Stipas* y un bosque de brinzales compuesto por especies arbóreas nativas de la región como el *Polylepis racemosa* (Quinual), *Buddleja Coriácea* (Colle) y especies introducidas tal como el *Pinus radiata* (Pino).

##### B. Fauna

Si bien la presencia de pasturas naturales y brinzales presentes en la zona de estudio representan un sistema silvopastoril en potencia, no tienen dicho fin ya que son laderas protegidas que fueron reforestadas en el marco del proyecto PRAA en las cuales no hay presencia de auquénidos, ni vacunos. La fauna se restringe a la presencia ocasional de águilas que sobrevuelan la zona.

### C. Pendiente

COORDENADAS UTM		ALTURA (M.S.N.M)	ÁNGULO (GRADOS)	PENDIENTE (%)
N	E			
8676745	491987	4328	25,24	41,1
8676779	491921	4293		

La Zona de Estudio N°1 ubicada en Huishna presenta más inclinación en comparación con la Zona Testigo ya que como se observa en la Tabla N° 18, la pendiente calculada posee un valor de 47,1 %.

### D. Inventario de Especies Forestales

PLANTACIONES	N° DE INDIVIDUOS	% DE COBERTURA	EDAD PROMEDIO (AÑOS)	ALTURA PROMEDIO (cm)
<i>P. racemosa</i> (vivos)	33	78,6	Plántulas de 5 años	34,6
<i>P. racemosa</i> (muertos)	8	19,0	-	-
<i>Pinus radiata</i>	1	2,4	Plántulas de 5 años	9,6

Como se detalla en la Tabla N° 19 el porcentaje de cobertura de Quinales vivos representa el 78,6 % de un total de 72 plantaciones inventariadas en la zona delimitada (Anexo N° 3), encontrándose 8 Quinales muertos y una solo plantación de Pino.

#### 4.1.1.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE – 2)

##### A. Flora

La flora de esta zona se caracterizó por la presencia de plantaciones maduras de Quinal, gramíneas de baja altura y una variedad de liquen (*Usnea barbata*) de la familia *Parmeliacea* conocida en la zona bajo el nombre común de Barba de Viejo.

## B. Fauna

El microclima generado por las diversas plantaciones en esta zona dio origen a la presencia masiva de mosquitos. Debido a la difícil accesibilidad de la zona no hay presencia de ganado.

## C. Pendiente

TABLA N° 20: Resultado del Cálculo de Pendiente de la Zona N° 2 (ZE - 2)				
COORDENADAS UTM		ALTURA (M.S.N.M)	ÁNGULO (GRADOS)	PENDIENTE (%)
N	E			
8672348	485674	3718	20,12	36,6
8672390	485686	3702		

La Zona de Estudio N° 2 presenta una pendiente empinada, ya que como se observa en la Tabla N° 20 el grado de inclinación que presenta es de 36,6 %.

## D. Inventario de especies

TABLA N° 21: Inventario de especies presentes en la Zona N° 2 (ZE - 2)				
PLANTACIONES	N° DE INDIVIDUOS	% DE COBERTURA	EDAD PROMEDIO (AÑOS)	ALTURA PROMEDIO (m)
<i>P. racemosa</i> (vivos)	75	82	15 años	8,7
<i>P. racemosa</i> (muertos)	17	18	10 años	7

En la Zona de Estudio N° 2 se inventarió 92 especies de la cuales el 82 % fueron Quinales que alcanzaban una altura promedio de 8,7 m. (Anexo N° 3). Las especies restantes corresponden a vegetación que se caracteriza por acompañar este tipo de bosques tal como se describe en la Tabla N° 21.

## 4.1.2 Resultados de la caracterización del perfil del suelo

### 4.1.2.1 Zona Testigo (ZT)

#### A. Propiedades

<i>TABLA N° 22: Propiedades de la Zona Testigo (ZT)</i>	
PROPIEDADES	%
Densidad Aparente (DA)	1,82
Capacidad de Campo (CC)	8,96
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	4,05
Humedad Inicial	4,66

La Tabla N° 22 detalla las diversas propiedades del suelo presente en la Zona Testigo, determinadas en Laboratorio (Anexo N° 2). Se puede apreciar que posee una baja capacidad de campo llegando sólo al 8,96 % saturándose fácilmente por predominar la arena en su clase textural.

### 4.1.2.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)

#### A. Horizontes

<i>TABLA N° 23: Horizontes de perfil del suelo de la Zona N° 1 (ZE - 1)</i>	
HORIZONTE	ALTURA (cm)
Horizonte "O"	5
Horizonte "A"	12
Horizonte "B"	19
Horizonte "BC"	12
Horizonte "C"	33

La Tabla N° 23 muestra la altura que cada horizonte presentó en el perfil del suelo de la Zona de Estudio N° 1. En este perfil se observaron 5 horizontes y la profundidad neta que la calicata alcanzó fue de 81 cm. (Anexo N° 3).

## B. Granulometría

% ARENA MUY GRUESA 2,00 – 1,00 mm	% ARENA GRUESA 1,00 – 0,50 mm	% ARENA MEDIA 0,50 – 0,25 mm	% ARENA FINA 0,25 – 0,10 mm	% ARENA MUY FINA 0,10 – 0,05 mm	% LIMO	% ARCILLA
17,52	18,24	14,6	10,32	13,58	18,02	7,72

La Tabla N° 24 muestra los diversos agregados presentes en el suelo de la ZE - 1, estando compuesto en un 74,26 % de arena, 18,02 % de limo y 7,72 % de arcilla, presentando una textura Franco Arenosa la cual es ideal para favorecer la infiltración y poder recargar los mantos acuíferos (Anexo N° 2).

## C. Propiedades del suelo

PROPIEDADES	%
Densidad Aparente (DA)	0,76
Capacidad de Campo (CC)	37,34
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	23,13
Humedad Inicial	37,31

La Tabla N° 25 detalla las diversas propiedades presentes en el suelo de la ZE - 1, observándose que el suelo está cerca de saturarse y llegar a Capacidad de Campo ya que cuenta con una humedad inicial de 37,31 % (Anexo N° 2).

### 4.1.2.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)

#### A. Horizontes

HORIZONTE	ALTURA (cm)
Horizonte "O"	4,5
Horizonte "A"	47
Horizonte "AB"	38,5

La Tabla N° 26 detalla la altura de los tres horizontes que se encontraron en la Zona de Estudio N° 2. Se pudo apreciar que el Horizonte A fue el que presentó mayor profundidad a diferencia del Horizonte O el cual estuvo compuesto por hojarasca propia de los rodales de Quinual (Anexo N° 3).

## B. Granulometría

<i>TABLA N° 27: Resultados de Granulometría de la muestra de la Zona N° 2 (ZE – 2)</i>						
% ARENA MUY GRUESA 2,00 – 1,00 mm	% ARENA GRUESA 1,00 – 0,50 mm	% ARENA MEDIA 0,50 – 0,25 mm	% ARENA FINA 0,25 – 0,10 mm	% ARENA MUY FINA 0,10 – 0,05 mm	% LIMO	% ARCILLA
24,08	21,44	16,06	8,18	4,02	19,98	6,24

La Tabla N° 27 muestra la granulometría del perfil de suelo de la ZE – 2, estando compuesto mayormente por arena, seguida de 19,98 % de limo y 6,24 % de arcilla, presentando una textura Franco Arenosa la cual es ideal para favorecer la infiltración y poder recargar los mantos acuíferos (Anexo N° 2).

## C. Propiedades

<i>TABLA N° 28: Propiedades del suelo de la Zona N° 2 (ZE – 2)</i>	
PROPIEDADES	%
Densidad Aparente (DA)	0,99
Capacidad de Campo (CC)	33,15
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	20,19
Humedad Inicial	23,82

La Tabla N° 28 refleja que el suelo de la Zona de Estudio N°2 (ZE – 2) presenta una Capacidad de Campo de 33,15 %, un Punto de Marchitez Permanente de 20,19 % y una Humedad Inicial de 23,82 % (Anexo N° 2).

### 4.1.3 Cálculo de la Fracción de Lluvia interceptada por el Follaje (*Ret*)

#### 4.1.3.1 Zona Testigo (ZT)

<b>AÑO HIDROLÓGICO</b> 2013 – 2014	<b>RETENCIÓN</b> (mm)
Julio	5,0
Agosto	5,0
Setiembre	5,0
Octubre	5,0
Noviembre	5,0
Diciembre	5,0
Enero	5,0
Febrero	5,0
Marzo	5,0
Abril	5,0
Mayo	5,0
Junio	5,0

Para determinar la Fracción de Lluvia interceptada por follaje se aplicó la fórmula N° 9 y dado que la ZT se caracteriza por la ausencia de cobertura vegetal, la retención por follaje adoptó el mínimo valor, tal como se puede observar en la Tabla N° 29.

#### 4.1.3.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)

<b>AÑO HIDROLÓGICO</b> 2013 – 2014	<b>RETENCIÓN</b> (mm)
Julio	5,0
Agosto	5,0
Setiembre	11,42
Octubre	12,66
Noviembre	7,94
Diciembre	19,73
Enero	22,39
Febrero	13,13
Marzo	19,80
Abril	6,25
Mayo	5,0
Junio	0

La determinación de la Fracción de lluvia interceptada por follaje en la ZE – 1, se empleó la fórmula N° 9, considerando el valor de 0,12 como coeficiente de retención, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla N° 30.

#### 4.1.3.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)

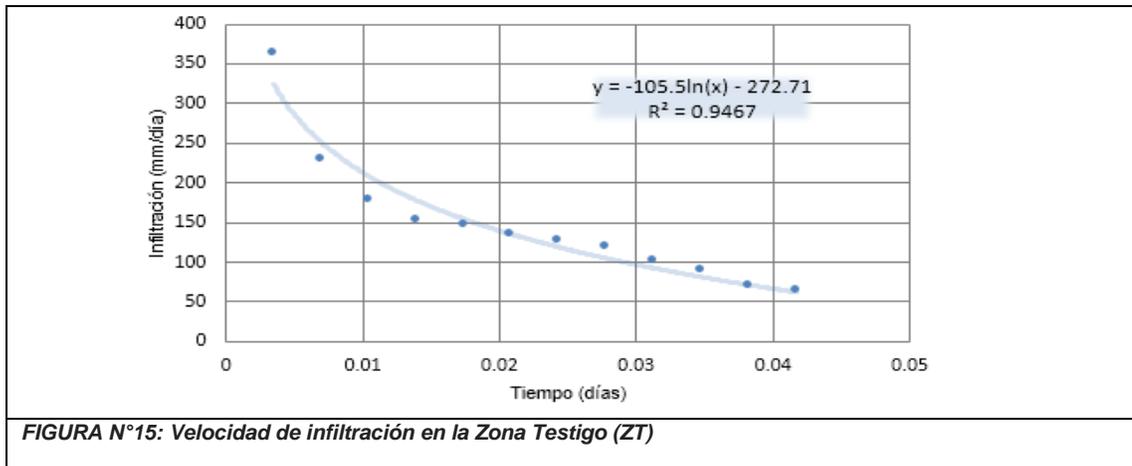
TABLA N° 31: Cálculo de retención en la Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)	
AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	RETENCIÓN (mm)
Julio	5,0
Agosto	5,0
Setiembre	11,42
Octubre	12,66
Noviembre	7,94
Diciembre	19,73
Enero	22,39
Febrero	13,13
Marzo	19,80
Abril	6,25
Mayo	5,0
Junio	0

Para la determinación de la retención de precipitación por efecto del follaje en la ZE - 2, se hizo uso de la fórmula N° 9 en la que se reemplazó valores de precipitación y el Coeficiente de Retención de follaje, el cual adoptó un valor de 0,12; ya que los bosques de Quinual no presentan una cobertura muy densa, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla N° 31.

#### 4.1.4 Cálculo de la Infiltración Básica ( $f_c$ )

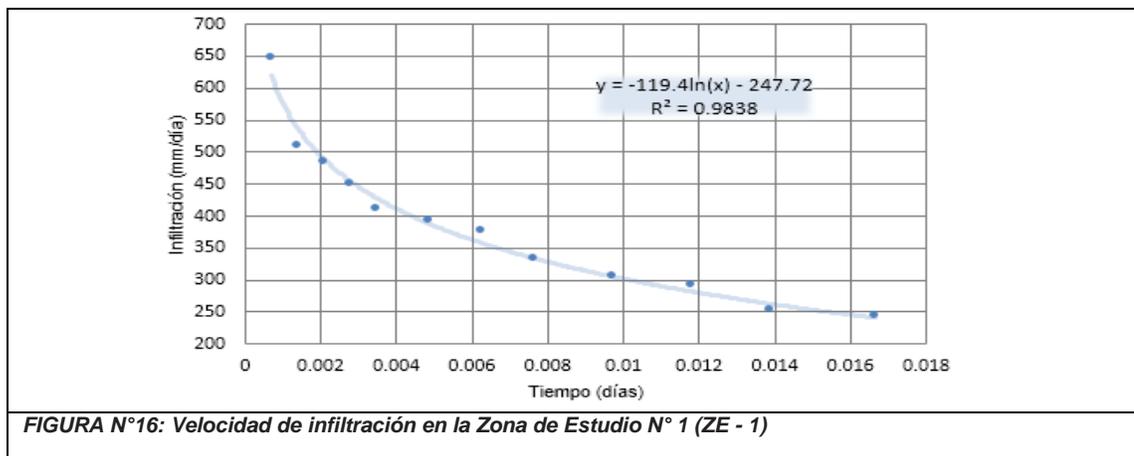
En las gráficas que se muestran a continuación, se ilustra la velocidad de infiltración para cada zona de estudio. En dichas gráficas se realizó una regresión logarítmica, ya que se obtuvo un  $R^2$  con mejor ajuste en cada caso, que al emplear una regresión lineal.

#### 4.1.4.1 Zona Testigo (ZT)



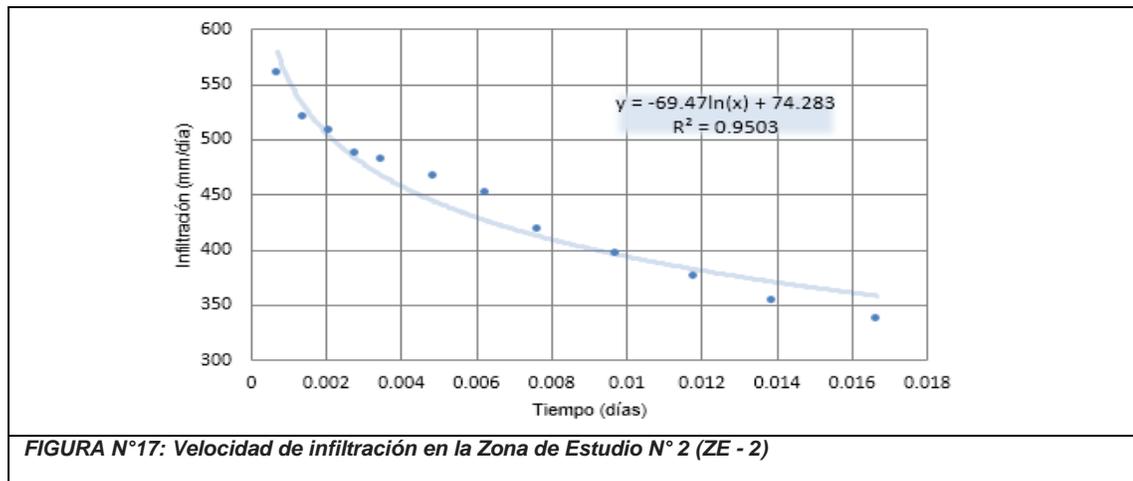
La Figura N° 15 muestra que la correlación entre la Infiltración Vs Tiempo es estadísticamente significativa presentando un  $R^2 = 0,9467$ . La tasa de infiltración básica promedio fue de 143,44 mm/día.

#### 4.1.4.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)



La Figura N° 16 indica que la línea de regresión se ajusta perfectamente con un  $R^2 = 0,9838$ . La tasa de infiltración básica promedio fue 249,87 mm/día (1,04 cm/h) alcanzada en un lapso de tiempo de 90 minutos.

#### 4.1.4.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)



Las variables determinadas en campo muestran una alta correlación, presentando  $R^2$  un valor de 0,9503; Figura N° 17. La infiltración básica promedio fue 310,80 mm/día (1,295 cm/h) en un tiempo de 105 minutos.

#### 4.1.5 Determinación del Coeficiente de Infiltración del suelo ( $C_i$ )

##### 4.1.5.1 Zona Testigo (ZT)

**TABLA N° 32: Determinación del Coeficiente de Infiltración en la Zona Testigo (ZT)**

FACTOR	CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE	
Pendiente (%)	27,50 %	$K_p$	0,06
Cobertura Vegetal	Sin Cobertura	$K_v$	0
Textura (fc)	143,45	$k_{fc}$	0,58
		$C_i$	0,64

En la Tabla N° 32 se muestran los valores empleadas para determinar  $C_i$ , siendo  $K_p$  y  $K_{fc}$  variables calculadas en la Tabla N° 17 y Figura N° 15 respectivamente.

#### 4.1.5.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)

TABLA N° 33: Determinación del Coeficiente de Infiltración en la Zona de Estudio N°1			
FACTOR	CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE	
Pendiente (%)	47,10 %	$K_p$	0,06
Cobertura Vegetal	Bosques + Cobertura con pastizal	$K_v$	0,188
Textura (fc)	249,87	$k_{fc}$	0,713
		$C_i$	0,96

Como se muestra en la Tabla N° 33 el valor del  $C_i$  para esta zona equivale a 0,96. Los valores de  $K_p$  y  $K_{fc}$  fueron hallados previamente (véase Tabla N°18 y Figura N°16), para calcular  $K_v$  se consideró a ZE - 1 como una zona conformada por un sustrato de bosques y cobertura con pastizales en una proporción de 40 % y 60 % respectivamente.

#### 4.1.5.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)

TABLA N° 34: Determinación del Coeficiente de Infiltración en la Zona de Estudio N°2			
FACTOR	CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE	
Pendiente (%)	36,60 %	$K_p$	0,06
Cobertura Vegetal	Bosques + Cobertura con zacate < 50 %	$K_v$	0,178
Textura (fc)	310,80	$K_{fc}$	0,761
		$C_i$	0,99

La fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal ( $K_v$ ) se determinó considerando para ello que la ZE - 2 está constituida por bosques y zacate en una relación de 80 % a 20 % respectivamente. En la Tabla N° 34 se muestran los valores  $K_p$  y  $K_{fc}$ , calculados preliminarmente (véase Tabla N° 20 y Figura N° 24), como resultado final se obtiene que  $C_i$  es 0,999.

#### 4.1.6 Cálculo de la precipitación efectiva ( $P_{ef}$ )

##### 4.1.6.1 Zona Testigo (ZT)

<i>TABLA N° 35: Cálculo de la Precipitación Efectiva en la Zona Testigo (ZT)</i>	
AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (mm)
Julio	9,8
Agosto	10,3
Setiembre	32,0
Octubre	88,3
Noviembre	54,3
Diciembre	142,1
Enero	135,8
Febrero	96,7
Marzo	128,0
Abril	46,0
Mayo	20,4
Junio	1,5

En la Tabla N° 35 se detalla la precipitación efectiva que se produce en cada mes, calculada a partir de la ecuación N° 12; siendo los meses comprendidos entre Diciembre y Marzo los que presentan los valores más altos.

##### 4.1.6.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)

<i>TABLA N° 36: Cálculo de la Precipitación Efectiva en la Zona de Estudio N°1 (ZE -1)</i>	
AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (mm)
Julio	20,0
Agosto	26,6
Setiembre	83,7
Octubre	92,8
Noviembre	58,2
Diciembre	144,6
Enero	164,1
Febrero	96,2
Marzo	145,1
Abril	45,8
Mayo	26,3
Junio	0,0

De igual manera, la precipitación efectiva para la ZE-1 se calculó mediante la ecuación N° 12, obteniendo que los valores superan los 20 mm/mes en época de estiaje, no obstante el mayor valor se produce en Enero según la Tabla N° 36.

#### 4.1.6.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (mm)
Julio	20,0
Agosto	26,6
Setiembre	83,7
Octubre	92,8
Noviembre	58,2
Diciembre	144,6
Enero	164,1
Febrero	96,2
Marzo	145,1
Abril	45,8
Mayo	26,3
Junio	0,0

Para la obtención de la precipitación efectiva, se reemplazaron datos de precipitación, coeficiente de infiltración y retención de lluvia por follaje, calculados previamente. Dado que se utilizó los datos de la Estación Meteorológica Acopalca para la ZE - 1 y la ZE - 2 los valores de precipitación efectiva no presentan variaciones, tal como se observa en la Tabla N° 37.

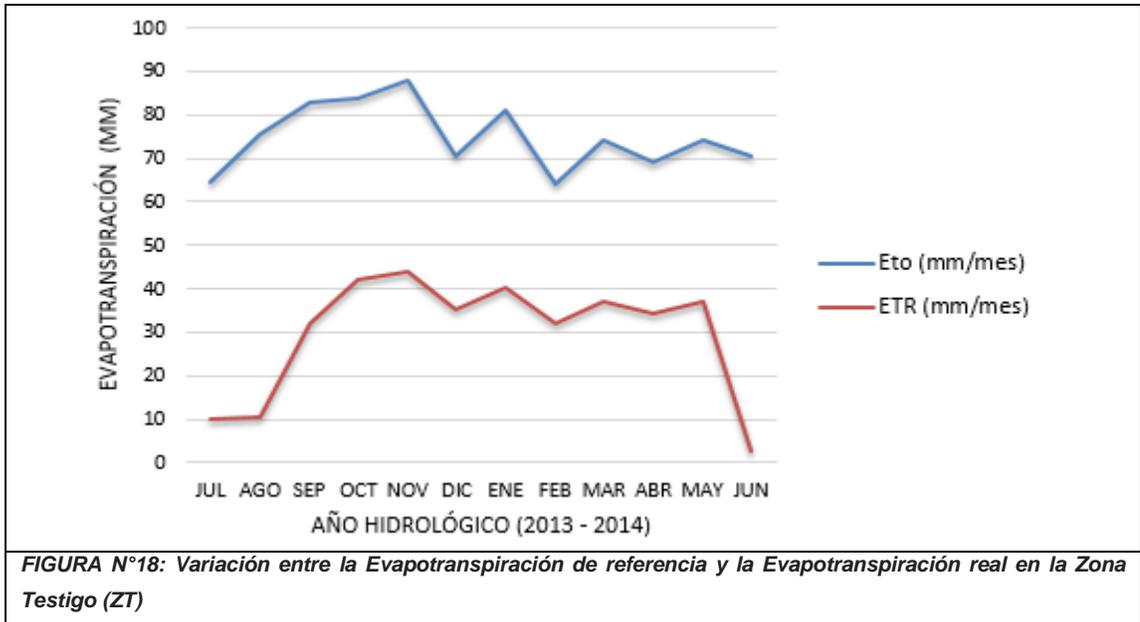
#### 4.1.7 Cálculo del *ETcultivo* y Evapotranspiración real (ETR)

##### 4.1.7.1 Zona Testigo (ZT)

La Tabla N° 38 muestra los resultados de Evapotranspiración de Referencia y la Evapotranspiración Real. Para la determinación de la  $ET_0$  se utilizó el programa CROPWAT, dicho software fundamenta sus cálculos en la ecuación de Penman-Monteith N° 38. De igual manera, la *ETR* se determinó mediante la ecuación N° 17.

**TABLA N° 38: Cálculo de la Evapotranspiración de referencia y Evapotranspiración real (ETR) en la Zona Testigo (ZT)**

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	ET <sub>0</sub> (mm/mes)	ETR (mm/mes)
Julio	64,8	9,82
Agosto	75,6	10,30
Setiembre	82,8	31,95
Octubre	84,0	42,01
Noviembre	87,9	43,95
Diciembre	70,4	35,19
Enero	80,9	40,46
Febrero	64,1	32,06
Marzo	74,4	37,20
Abril	69,0	34,50
Mayo	74,4	37,20
Junio	70,5	2,58



La Figura N° 18 refleja que los valores de evapotranspiración real muestran una tendencia que se encuentra por debajo de la evapotranspiración de referencia en la ZT, esto debido a que en la ecuación que determina la *ETR* se considera el valor de la  $ET_{cultivo}$ , y al ser la ZT carente de vegetación ese valor es nulo, por consiguiente se refleja una disminución con respecto a la  $ET_0$ .

#### 4.1.7.2 Zona de Estudio N° 1 (ZE - 1)

De igual manera, para el cálculo de la  $ET_0$  en la ZE – 1 se utilizó el software CROPWAT. Se empleó la ecuación N° 32 para la determinación de la  $ET_{cultivo}$ , en esta ecuación se emplea la  $ET_0$  calculada previamente y el coeficiente de cultivo ( $Kc$ ) propio del *Polylepis racemosa*. Finalmente la integración del coeficiente de humedad, evapotranspiración de cultivo y la humedad disponible en la ecuación N° 17 da como resultado la Evapotranspiración Real que se muestra a continuación en la Tabla N° 39.

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	$ET_0$ (mm/mes)	$ET_{cultivo}$ (mm/mes)	ETR (mm/mes)
Julio	72,54	30,47	21,54
Agosto	86,49	36,33	25,78
Setiembre	95,4	40,07	34,03
Octubre	97,96	41,14	38,42
Noviembre	103,2	43,34	35,04
Diciembre	80,6	33,85	33,85
Enero	94,86	39,84	39,84
Febrero	75,6	31,75	31,75
Marzo	86,8	36,46	36,46
Abril	78,9	33,14	30,17
Mayo	79,67	33,46	27,98
Junio	68,4	28,73	21,42

Los valores de evapotranspiración de cultivo y la evapotranspiración real en la ZE - 1 difieren en mayor parte de los meses, no obstante, coinciden en los meses que presentan mayor precipitación donde la humedad disponible permite que las plantaciones no restrinjan su consumo de agua, tal como se puede apreciar en la Figura N° 19.

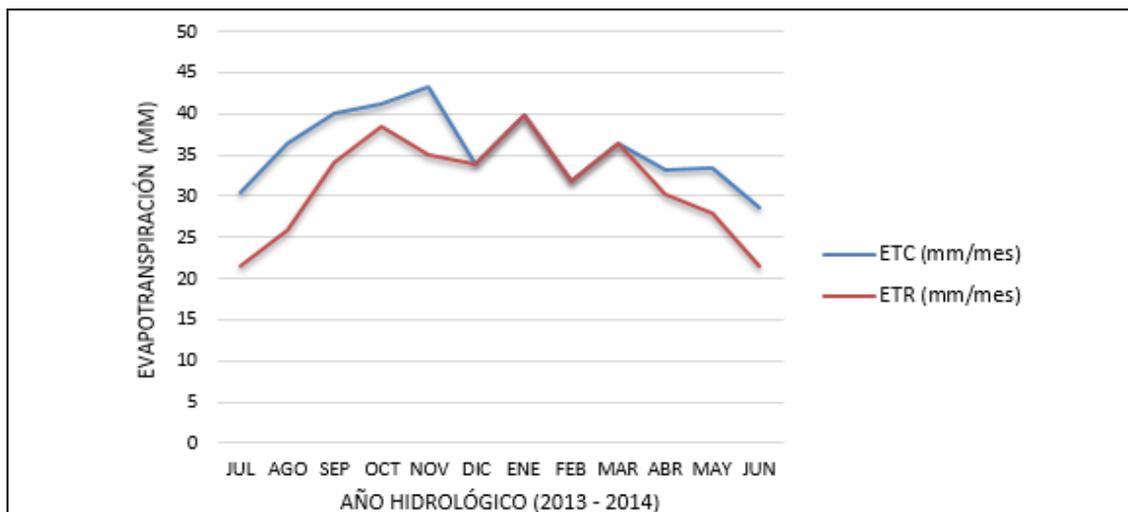


FIGURA N°19: Variación entre la Evapotranspiración de cultivo y la Evapotranspiración real en la Zona de Estudio N°1 (ZE--1)

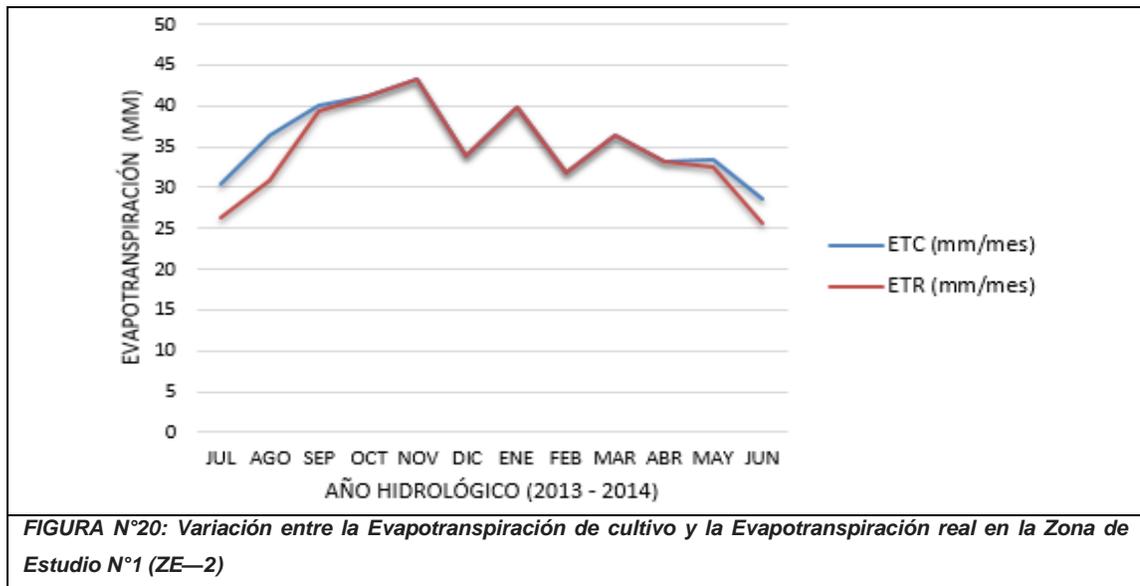
#### 4.1.7.3 Zona de Estudio N° 2 (ZE - 2)

TABLA N° 40: Cálculo de la Evapotranspiración de cultivo y Evapotranspiración real (ETR) en la Zona de Estudio N°2 (ZE - 2)

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	ET <sub>0</sub> (mm/mes)	ETcultivo (mm/mes)	ETR (mm/mes)
Julio	72,54	30,47	26,28
Agosto	86,49	36,33	30,87
Setiembre	95,4	40,07	39,28
Octubre	97,96	41,14	41,14
Noviembre	103,2	43,34	43,34
Diciembre	80,6	33,85	33,85
Enero	94,86	39,84	39,84
Febrero	75,6	31,75	31,75
Marzo	86,8	36,46	36,46
Abril	78,9	33,14	33,14
Mayo	79,67	33,46	32,44
Junio	68,4	28,73	25,74

Análogamente, para el cálculo de la  $ET_0$  en la ZE – 1 se utilizó el software CROPWAT. Se empleó la ecuación N° 32 para la determinación de la  $ET_{cultivo}$ , en esta ecuación se emplea la  $ET_0$  calculada previamente y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) propio del *Polylepis racemosa*. Finalmente la integración del

coeficiente de humedad, evapotranspiración de cultivo y la humedad disponible en la ecuación N° 17 da como resultado los valores de Evapotranspiración Real que se muestran en la Tabla N° 40.



Para la Zona de Estudio N° 2 los valores de evapotranspiración de cultivo y la evapotranspiración real presentaron un mayor grado de coincidencia a lo largo de los meses del año, debido a que el suelo presente en esta zona presenta una saturación constante, derivando en que las plantaciones de *Polylepis racemosa* no limiten el consumo de agua que requieren.

#### 4.1.8 Determinación de la Humedad Inicial del suelo (*HSi*) y Humedad del Suelo al final del mes (*HSf*)

##### 4.1.8.1 Zona Testigo (ZT)

*TABLA N° 41: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la Zona Testigo*

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	HSi (mm/mes)	HSf (mm/mes)
Julio	14,74	14,74
Agosto	14,74	14,74
Setiembre	14,74	14,74
Octubre	14,74	32,61
Noviembre	32,61	32,61
Diciembre	32,61	32,61
Enero	32,61	32,61
Febrero	32,61	32,61
Marzo	32,61	32,61
Abril	32,61	32,61
Mayo	32,61	15,81
Junio	15,81	14,74

Se eligió a Marzo como el mes que presenta una *HSi* igual a la *CC*, la *HSf* se calculó en base a la ecuación N° 18; obteniendo los resultados de la Tabla N° 41.

##### 4.1.8.2 Zona de Estudio N°1 (ZE-1)

*TABLA N° 42: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la Zona de Estudio N° 1*

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	HSi (mm/mes)	HSf (mm/mes)
Julio	146,14	143,82
Agosto	143,82	143,59
Setiembre	143,59	170,27
Octubre	170,27	170,27
Noviembre	170,27	170,27
Diciembre	170,27	170,27
Enero	170,27	170,27
Febrero	170,27	170,27
Marzo	170,27	170,27
Abril	170,27	170,27
Mayo	170,27	167,56
Junio	167,56	146,14

Para determinar la humedad inicial en la Zona de Estudio N° 2, se aplicó el criterio descrito en la metodología siendo Marzo el mes seleccionado para asignar la capacidad de campo como humedad inicial. Como se puede apreciar en la Tabla N° 42 la mayor parte del año el suelo se encuentra a capacidad de campo. Asimismo, la humedad final se determinó en base a la ecuación N° 18, en la que se reemplazan los valores de Humedad Disponible, Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de campo, Evapotranspiración Real y Humedad Inicial.

#### 4.1.8.3 Zona de Estudio N°2 (ZE-2)

<i>TABLA N° 43: Determinación de la (HSi) y (HSf) en la Zona de Estudio N°2</i>		
AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	HSi (mm/mes)	HSf (mm/mes)
Julio	460,13	453,84
Agosto	453,84	449,55
Setiembre	449,55	492,28
Octubre	492,28	492,28
Noviembre	492,28	492,28
Diciembre	492,28	492,28
Enero	492,28	492,28
Febrero	492,28	492,28
Marzo	492,28	492,28
Abril	492,28	492,28
Mayo	492,28	486,13
Junio	486,13	460,40

La Tabla N° 43 presenta los valores de humedad inicial y humedad final calculados para la Zona de Estudio N° 2. Se seleccionó a Diciembre, Enero y Febrero como los tres meses consecutivos en los que la precipitación efectiva superó a la evapotranspiración, siendo Marzo el mes al que se le estableció como valor de humedad inicial la capacidad de campo. De manera semejante, la humedad final se calculó mediante la ecuación N° 18 en la que se reemplazan valores de la Tabla N° 28 concernientes a las propiedades del suelo de la ZE – 2; tales como (*HD, CC y PMP*), además de los valores de *ETR* y *HSi* calculados preliminarmente.

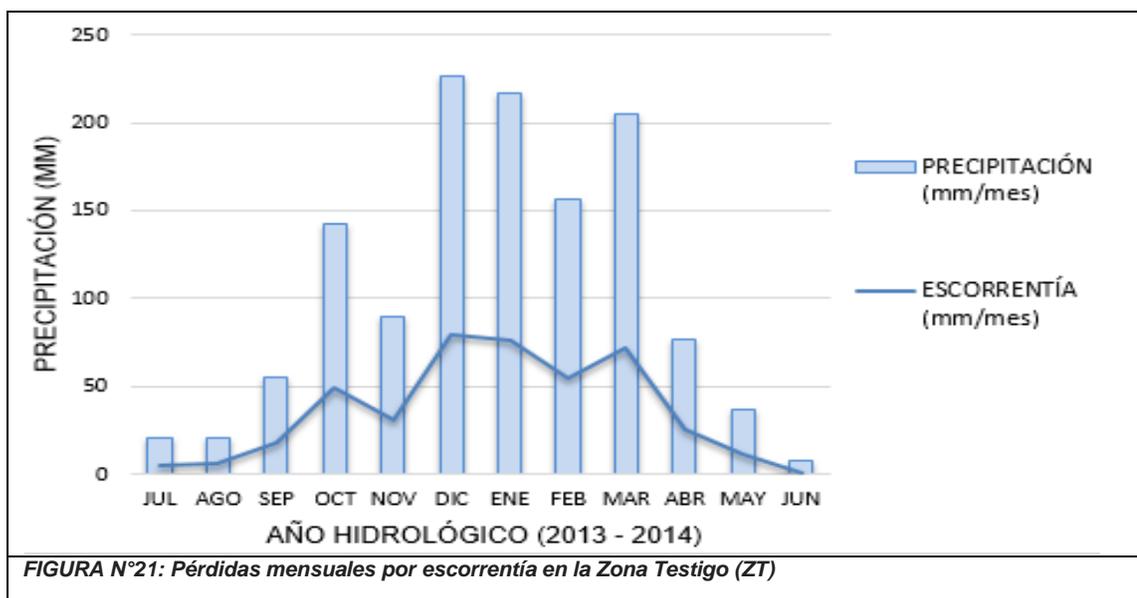
#### 4.1.9 Cálculo de la Escorrentía (ESC)

##### 4.1.9.1 Zona Testigo (ZT)

Los resultados de escorrentía para la ZT presentados a continuación en la Tabla N° 44, se obtuvieron mediante el empleo de la fórmula N° 19, en la que se interrelacionan las variables; Precipitación, Retención y Precipitación Efectiva.

TABLA N° 44: Cálculo de la Escorrentía en la Zona Testigo (ZT)	
AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	ESCORRENTÍA (mm/mes)
Julio	5,50
Agosto	5,78
Setiembre	17,91
Octubre	49,78
Noviembre	30,41
Diciembre	79,67
Enero	76,12
Febrero	54,22
Marzo	71,74
Abril	25,76
Mayo	11,43
Junio	0,85

La gráfica N° 21 se denota que las pérdidas por escorrentía se dan durante todo el año hidrológico, siendo predominante en los meses de Octubre a Marzo.



#### 4.1.9.2 Zona de Estudio N°1 (ZE - 1)

A continuación en la Tabla N° 45 se muestran los resultados de escorrentía para la ZE – 1, los cuales fueron calculados en base a la ecuación N° 19.

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	ESCORRENTÍA (mm/mes)
Julio	0,79
Agosto	1,05
Setiembre	3,30
Octubre	3,66
Noviembre	2,29
Diciembre	5,70
Enero	6,47
Febrero	3,79
Marzo	5,72
Abril	1,81
Mayo	1,04
Junio	0

En la figura N° 22 se grafica las perdidas por escorrentía en la Zona de Estudio N° 1, observándose en relación con la precipitación, estas pérdidas son mínimas.

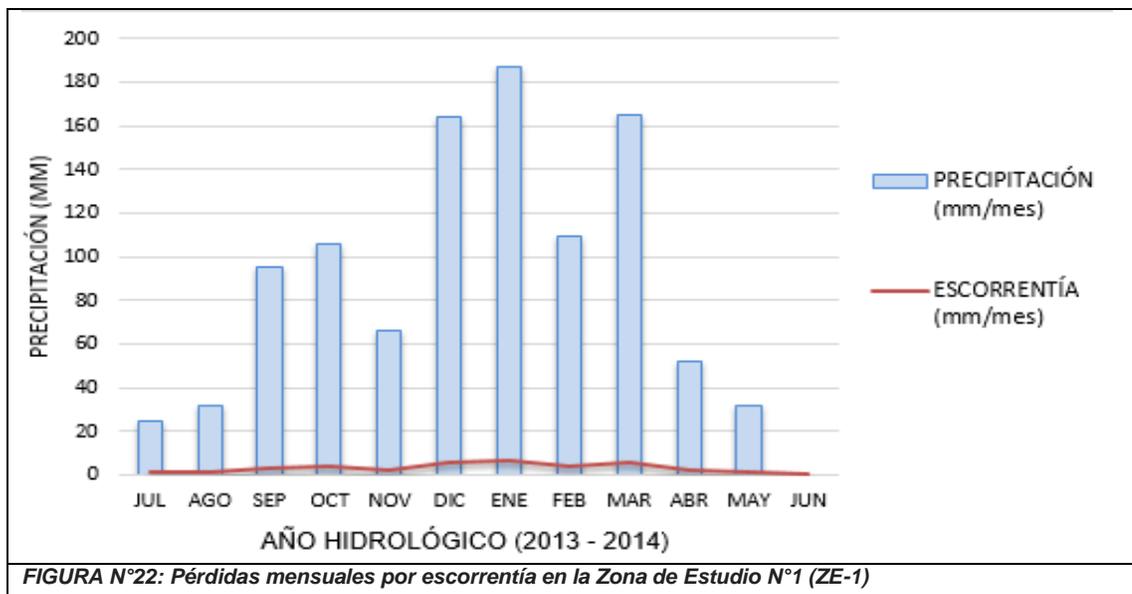


FIGURA N°22: Pérdidas mensuales por escorrentía en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1)

#### 4.1.9.3 Zona de Estudio N°2 (ZE - 2)

Los resultados de escorrentía para la ZE – 2 detallados en la Tabla N° 46 muestran que esta zona es la que menor pérdidas posee por efecto de escorrentía ya que sólo representa el 0,04 % de la precipitación anual, éstos resultados se obtuvieron mediante el empleo de la fórmula N° 19.

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	ESCORRENTÍA (mm/mes)
Julio	0,010
Agosto	0,013
Setiembre	0,043
Octubre	0,047
Noviembre	0,030
Diciembre	0,074
Enero	0,084
Febrero	0,049
Marzo	0,074
Abril	0,023
Mayo	0,013
Junio	0

En la gráfica N° 23, se puede observar las pérdidas por escorrentía son mínimas y no son significativas en el balance hídrico de esta zona,

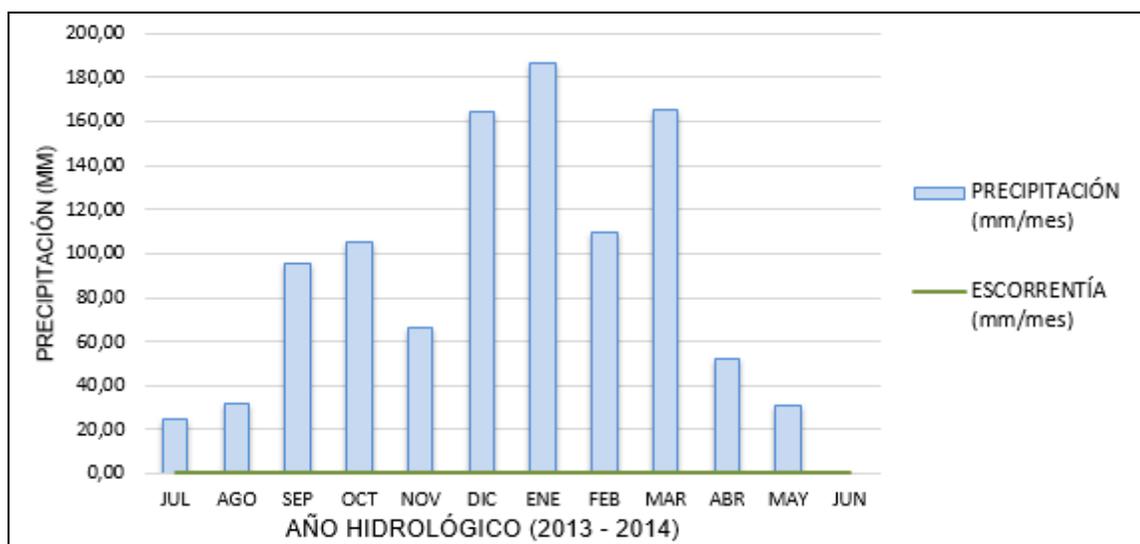


FIGURA N°23: Pérdidas mensuales por escorrentía en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2)

#### 4.1.10 Cálculo de la Recarga Potencial ( $R_p$ )

##### 4.1.10.1 Zona de Testigo (ZT)

La Tabla N° 47 detalla a continuación los valores de recarga obtenidos en la ZT, apreciándose que sólo los meses con mayor volumen de precipitación generan una recarga hídrica. El aporte anual de esta zona es de 76 mm equivalentes al 6,06 % de la precipitación neta, estos resultados se obtuvieron aplicando la fórmula N° 20, en la que se interrelacionan variables calculadas anteriormente como;  $P_{ef}$ ,  $HSi$ ,  $HSf$ ,  $ETR$  y  $ESC$ .

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	RECARGA POTENCIAL (mm/mes)
Julio	0
Agosto	0
Setiembre	0
Octubre	0
Noviembre	0
Diciembre	27,3
Enero	19,2
Febrero	10,5
Marzo	19,1
Abril	0
Mayo	0
Junio	0

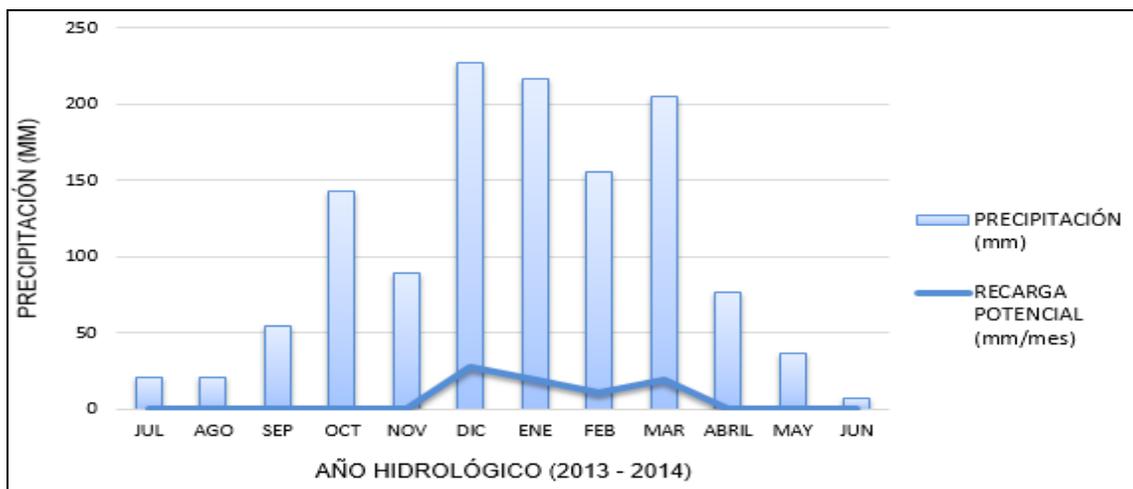


FIGURA N°24: Precipitación Vs. Recarga potencial de acuíferos en la Zona Testigo (ZT)

#### 4.1.10.2 Zona de Estudio N°1 (ZE - 1)

Los resultados descritos en la Tabla N° 48 muestran el volumen de recarga que se genera mensualmente, sumando un valor de 459,37 mm/anuales (44,50 %). Si bien se genera una recarga en la mayoría de meses en comparación con la Zona Testigo, los mayores aportes al balance hídrico corresponden a Diciembre, Enero, Febrero y Marzo en los cuales las precipitaciones son más intensas. De igual manera, estos valores se obtuvieron al emplear la fórmula N° 20.

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	RECARGA POTENCIAL (mm/mes)
Julio	0
Agosto	0
Setiembre	16,5
Octubre	47,1
Noviembre	18,6
Diciembre	99,4
Enero	111,4
Febrero	56,9
Marzo	97,3
Abril	12,1
Mayo	0
Junio	0

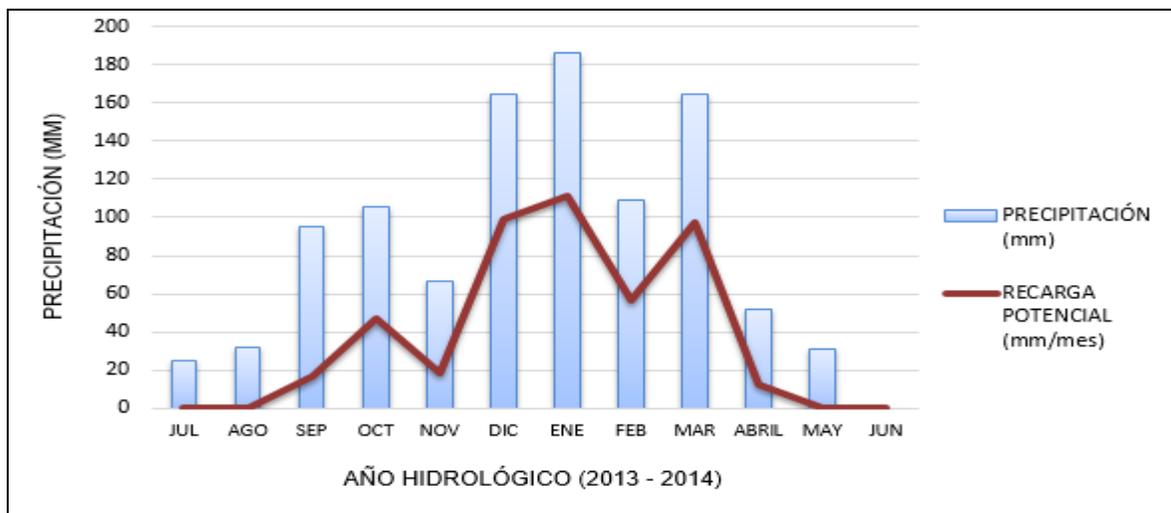
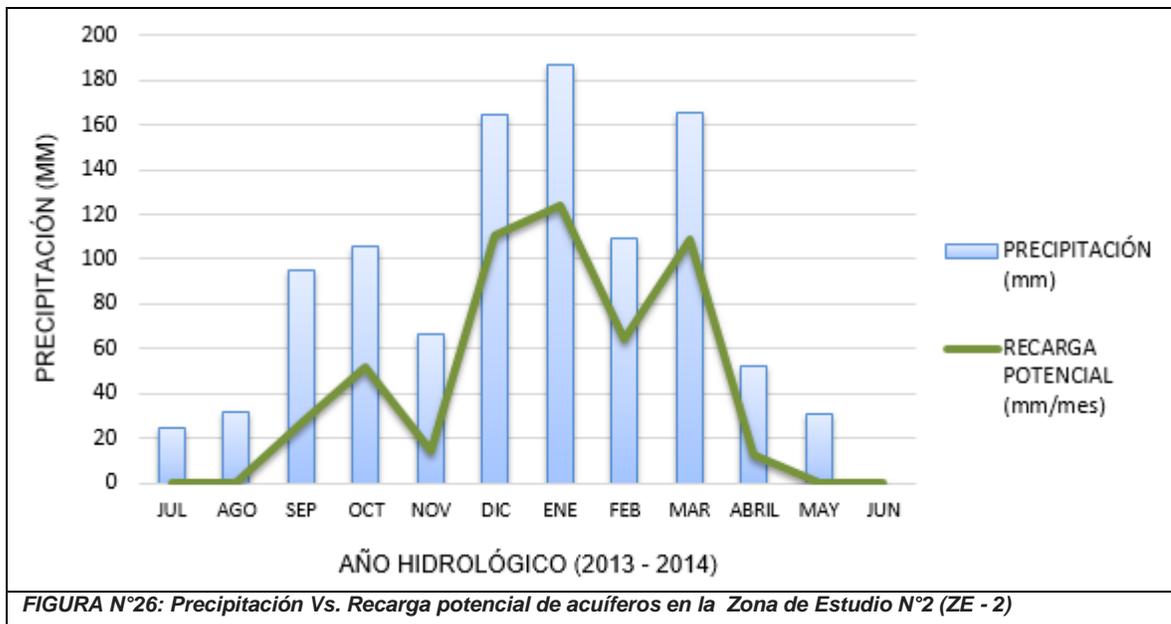


FIGURA N°25: Precipitación Vs. Recarga potencial de acuíferos en la Zona de Estudio N°1 (ZE - 1)

#### 4.1.10.3 Zona de Estudio N°2 (ZE – 2)

Según la Tabla N° 49 el volumen anual de recarga en esta zona es de 513,71 mm (49,76 %), registrando picos que sobrepasan los 100 mm, siendo Enero el mes con mayor aporte seguido de Marzo, Diciembre y Febrero. Estos datos se obtuvieron después de aplicar la ecuación N° 20 en la que se interrelacionan las principales entradas y salidas en el balance hídrico.

AÑO HIDROLÓGICO 2013 – 2014	RECARGA POTENCIAL (mm/mes)
Julio	0
Agosto	0
Setiembre	26,7
Octubre	51,6
Noviembre	14,9
Diciembre	110,7
Enero	124,2
Febrero	64,4
Marzo	108,6
Abril	12,7
Mayo	0
Junio	0



#### 4.1.11 Variación de la Recarga Hídrica por Zona de estudio

La Figura N° 27 muestra la variación que presenta cada zona de estudio, observándose que la ZE - 1 y la ZE - 2 son las que generan mayor recarga durante todo el año aproximadamente.

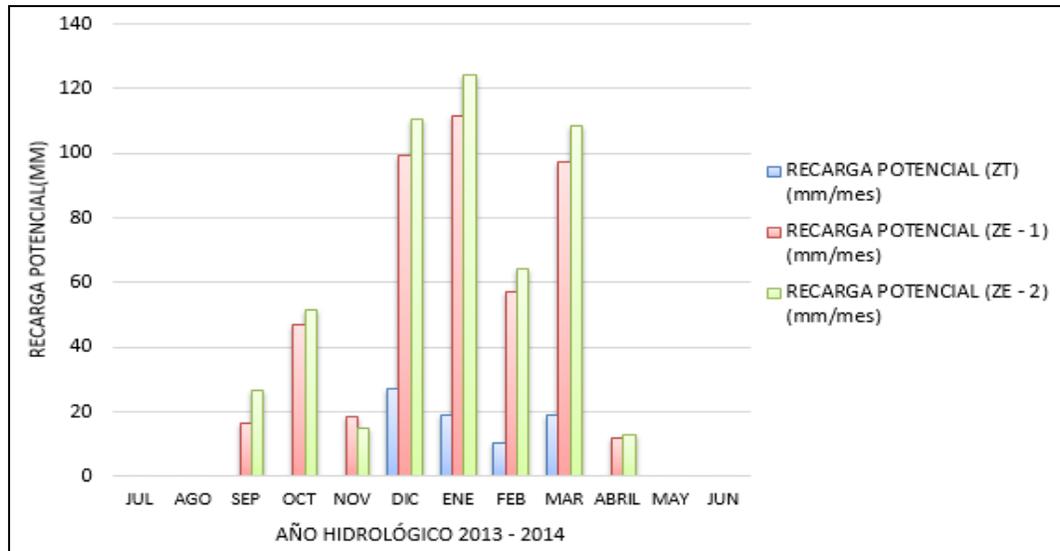


FIGURA N°27: Variación de la recarga hídrica potencial en las tres Zonas de Estudio en un año hidrológico

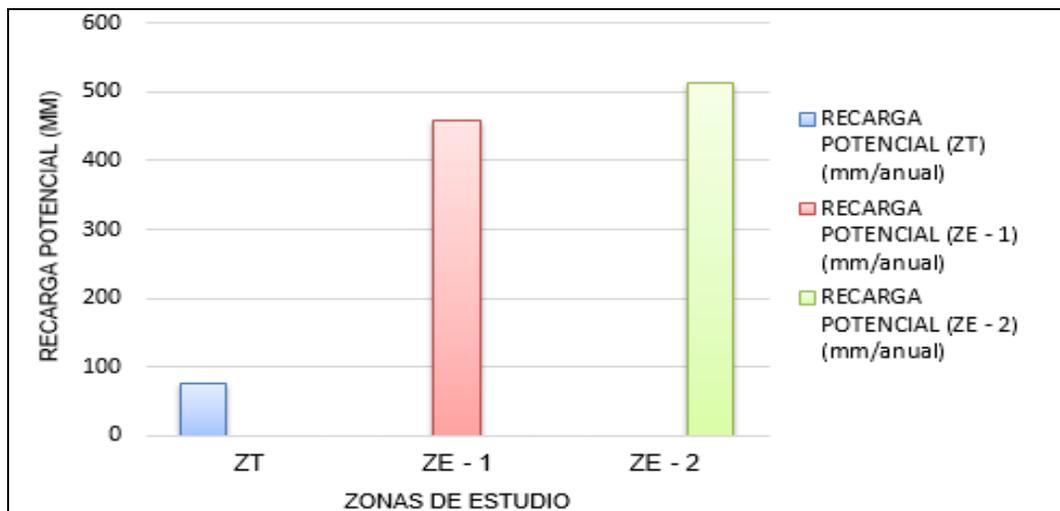


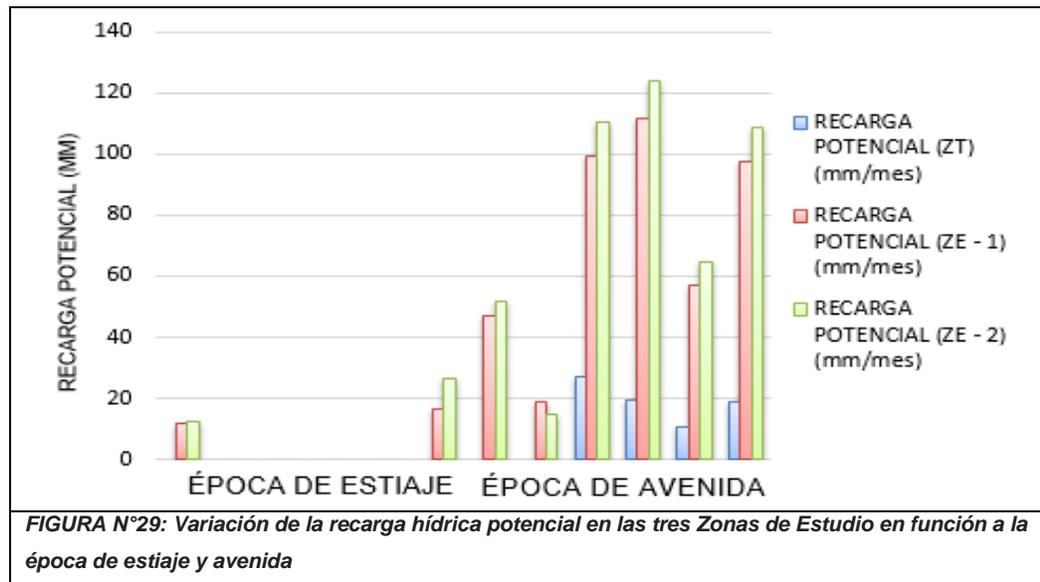
FIGURA N°28: Aporte volumétrico por Zonas de Estudio en un año hidrológico

En la Figura N° 28 se observa que la ZE-2 es la que produce una mayor recarga hídrica aportando 513,71 mm/anales, seguida de la ZE-1, con

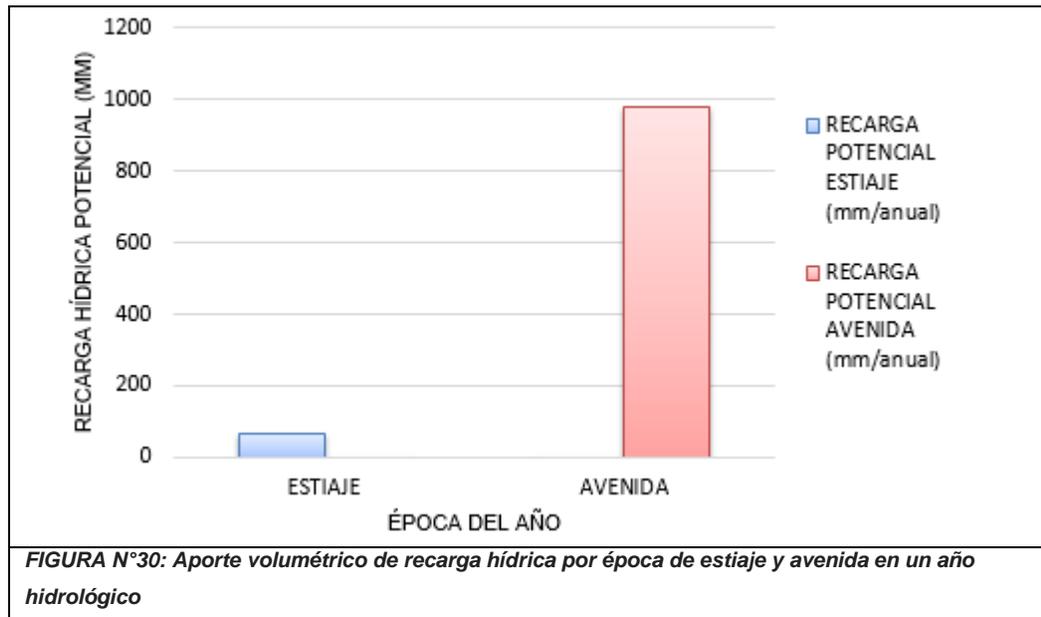
459,367 mm/anuales, finalmente la Zona Testigo genera el menor volumen con una recarga de 76 mm, correspondiendo al 49,76, 44,50 % y 6,06 % de la precipitación neta respectivamente.

#### 4.1.12 Variación de la Recarga Hídrica por época del año

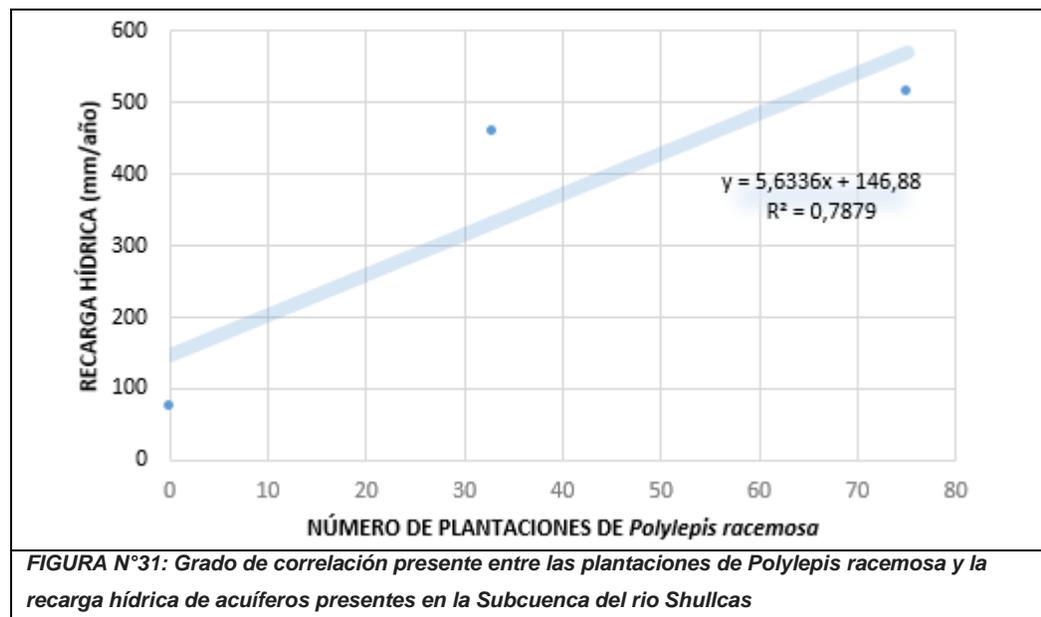
De acuerdo a la Figura N° 29, en la época de estiaje, sólo la ZE - 1 y la ZE - 2 generan una escasa recarga durante este periodo, en tanto, en la época de avenida la ZT aporta un volumen significativo en el balance hídrico, siendo ZE - 1 y ZE - 2 las zonas que presentan una mayor recarga.



En la Figura N° 30 se observa que la recarga potencial generada por las tres zonas de estudio en época de avenida estiaje es de 68 mm/anuales, a diferencia de la época de avenida, periodo en el cual el volumen recargado constituye un valor de 981 mm al año.



**4.1.13 Grado de correlación entre la Recarga Hídrica y el Número de Plantaciones presentes en cada zona de estudio.**



En la Figura N° 31 se observa el grado de correlación presente entre el número de plantaciones de *Polylepís racemosa* en cada zona de estudio

y el respectivo aporte en la generación de recarga hídrica, demostrando que las plantaciones influyen significativamente en un 78% en la recarga hídrica de acuíferos; es decir, una planta de *Polylepis racemosa* genera una recarga de 5,6336 mm al año.

#### 4.1.14 Comportamiento de la Precipitación Efectiva vs Incremento de Caudal de los Manantiales

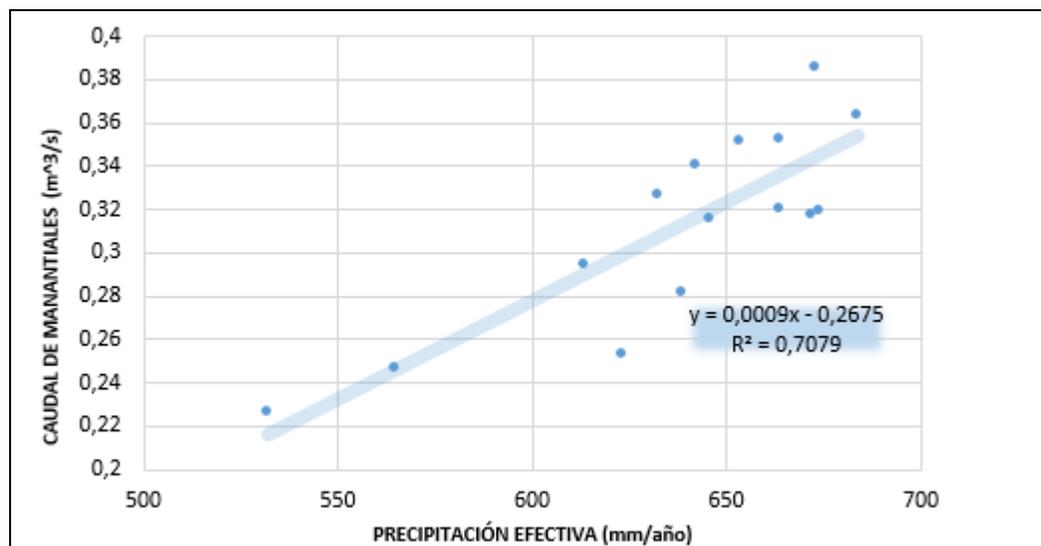


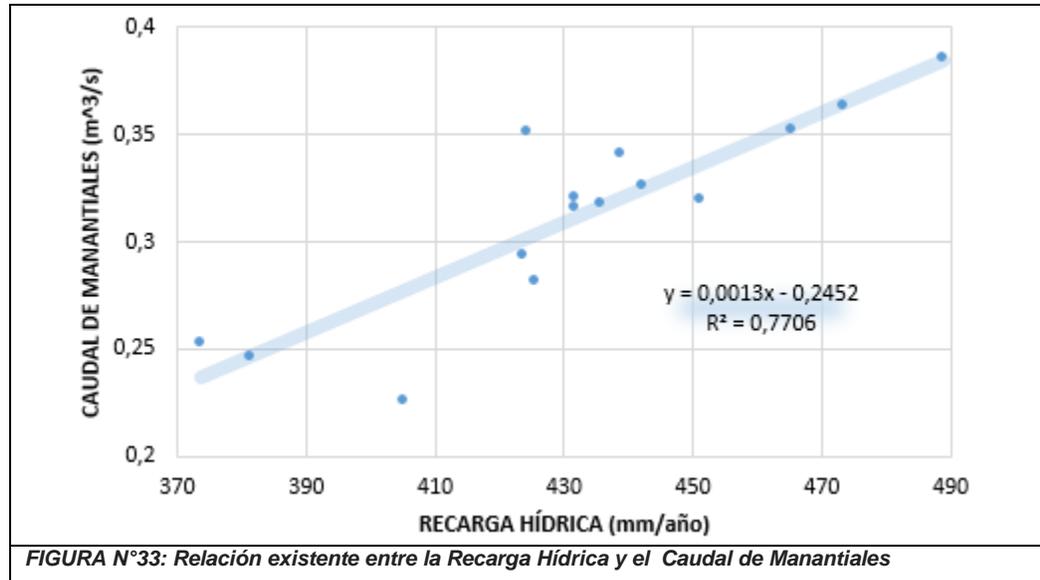
FIGURA N°32: Comportamiento del Caudal de manantiales presentes en la Subcuenca del Río Shullcas en función a la Precipitación Efectiva

En la Figura N° 32 se observa que relación existente entre la precipitación efectiva y el caudal de los manantiales, ya que por cada 1 mm de precipitación efectiva el caudal de los manantiales incrementa en 0.0009 m<sup>3</sup>.

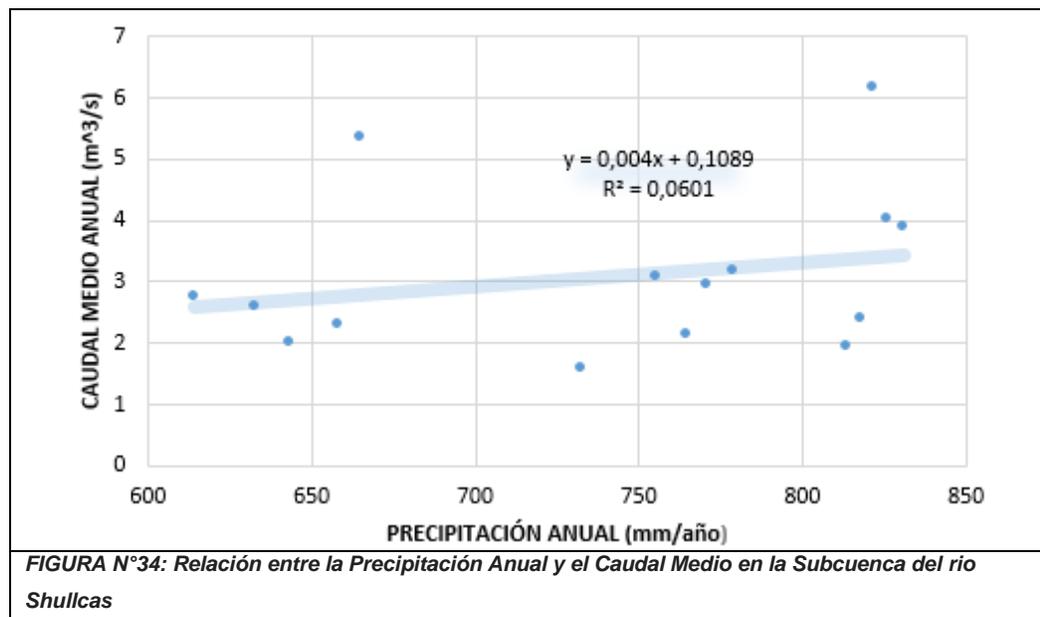
#### 4.1.15 Recarga hídrica vs Caudal de manantiales presentes en del río Shullcas

En la Figura N° 33 se grafica el comportamiento que presenta el caudal de manantiales en función a la recarga hídrica anual que se da en la Subcuenca del Río Shullcas, observándose que por cada 1 mm de recarga hídrica generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) se

produce un incremento 0.0013 m<sup>3</sup> en el caudal de manantiales, los cuales son alimentados por aguas subterráneas.



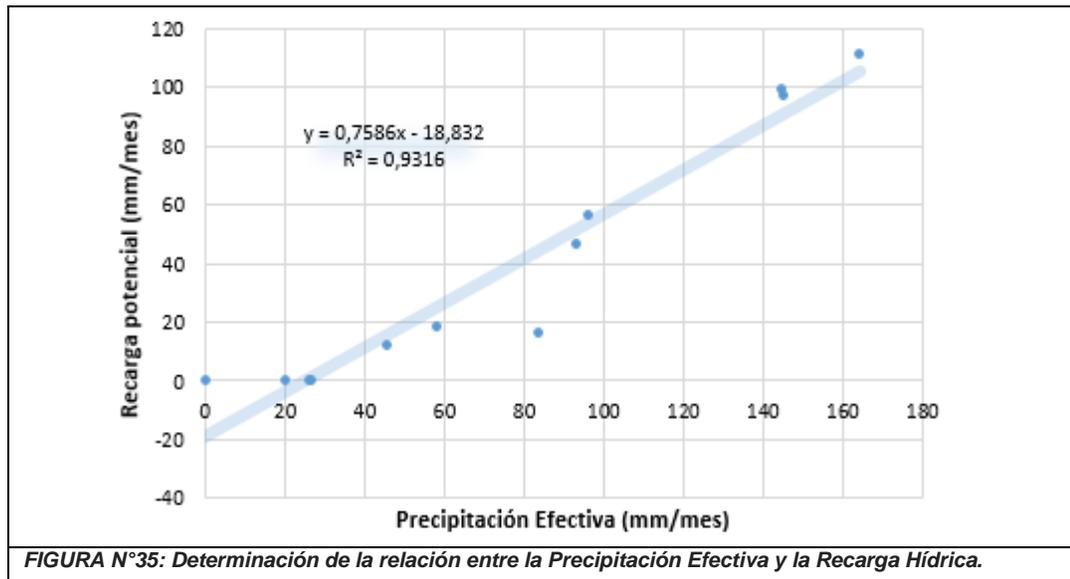
#### 4.1.16 Comportamiento del Caudal Medio Anual en la Subcuenca del Río Shullcas con relación a la Precipitación.



En la Figura N°34 se observa que existe una relación desestimable entre la precipitación y el caudal medio anual en la Subcuenca.

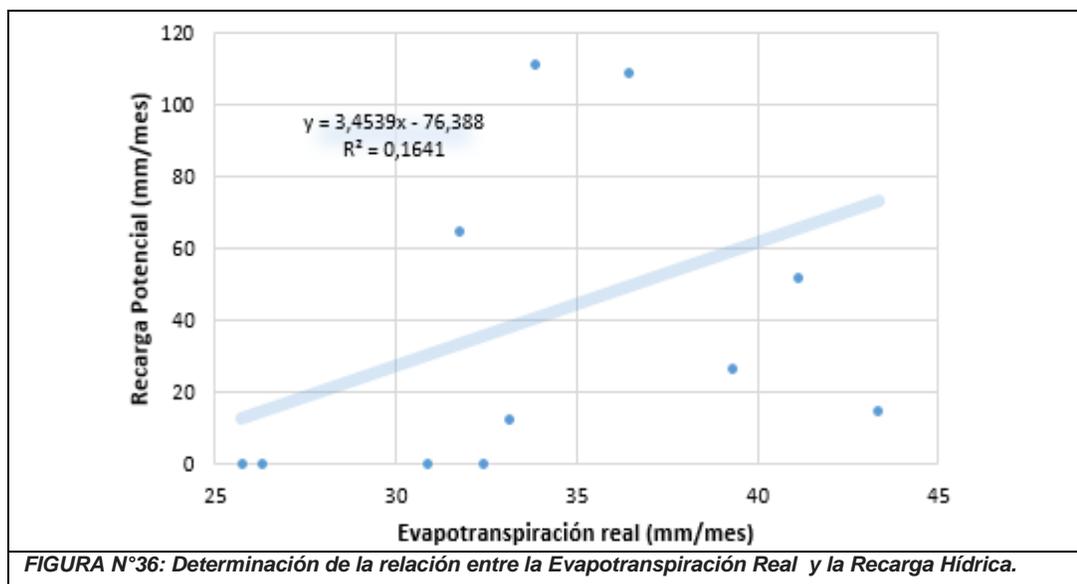
#### **4.2 Discusión de Resultados**

La cuenca del río Shullcas recibe en promedio 1143,15 mm anuales de precipitación, constituyendo la principal entrada para que se lleve a cabo el proceso de la recarga hídrica, no obstante, sólo parte del agua que precipita logra infiltrar para que sea retenida en el suelo y aprovechada por las plantas o percole para recargar caudales subterráneos, reflejando una relación directamente proporcional entre la precipitación efectiva y la recarga hídrica, reflejando esa relación mediante la ecuación;  $y = 0,7586x - 18,832$ , y un coeficiente de determinación igual a 0,9316 siendo la época de avenida (Octubre – Marzo), el periodo en el que se produce un mayor volumen de recarga, aproximadamente 981 mm/año, a diferencia de la época de estiaje (Abril – Setiembre) en la que la recarga sólo alcanza el volumen de 68 mm/año. Estos resultados son congruentes con los obtenidos por Blanco (2010), en su investigación titulada “Áreas de recarga hídrica de la parte media – alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica”, en el que sostiene que los meses comprendidos entre Mayo y Diciembre que son los más lluviosos presentando valores de precipitación mensual que oscilan entre 330 mm. y 500 mm., son los que presentan mayor infiltración y aporte a las aguas subterráneas. Igualmente, en los meses comprendidos entre enero y abril se presentan las precipitaciones menores con promedios que oscilan entre 90 y 300 mm., periodos en los que el volumen de recarga es mínimo. Siendo la precipitación promedio anual de estas microcuencas 4185,3 mm., de los cuales 1674,12 mm/año recargan los acuíferos presentes, concluyendo que la recarga de aguas subterráneas proviene directamente de las precipitaciones, dándose mayor recarga potencial en los meses que imperan las precipitaciones.



La evapotranspiración real registrada en la ZE – 2 fue de 40,11 % siendo mayor en comparación a la ZE - 1 donde la ETR fue 36,45 % de la precipitación neta para un periodo de evaluación de Julio 2013 a Junio 2014, no obstante las pérdidas registradas por ETR son considerablemente inferiores a los obtenidos por Oyarzún, Huber y Ellies (1985) quienes evaluaron la evapotranspiración en plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera natural concluyendo que para un periodo de seis meses la evapotranspiración en rodales adultos de Pino correspondió al 76 % y en la pradera este valor solo significó el 29 % ,concluyendo en que el alto consumo de agua por parte de los pinos disminuyen las reservas de agua en el suelo debido a que son especies arbóreas de crecimiento rápido. Así mismo; Oyarzún, Huber y Ellies (1985) sugieren que los bosques nativos permiten un mayor reflujó de agua al ciclo hidrológico en comparación con rodales de especies introducidas por su bajo consumo de agua reflejado en los valores de evapotranspiración, tal como lo demuestran años más tarde De las Salas y García (2000) quienes compararon el comportamiento hídrico en la cuenca del río San Cristóbal bajo tres tipos de vegetación (Ciprés, Eucalipto y Bosque Nativo), concluyendo en que el almacenamiento de agua en el suelo por Bosque Nativo fue 46 %,

contra 42 % de Eucalipto y 36 % de Ciprés, reflejando una mayor eficiencia por parte del Bosque Nativo ya que las pérdidas por evapotranspiración son menores en comparación con la especies citadas. Resultados que son afines con los de Gonzáles y Rodríguez (2013) quienes evaluaron el balance hídrico de un Bosque de *Polylepis pepeí* concluyendo en que los 61 192 (l/m<sup>2</sup>) evapotranspirados mensualmente por las plantaciones de *Polylepis pepeí* (equivalentes al 33,7 %) constituye un valor menor comparado con la evapotranspiración de otras especies, permitiendo que la recarga hídrica ascienda a 108 222 (l/m<sup>2</sup>)\*mes correspondiente al 59,6 % de la precipitación incidente. Sin embargo, la recarga hídrica y la evapotranspiración real generada por el *Polylepis racemosa* (Quinual) no se ajustaron a un modelo lineal, pues al ser la recarga hídrica un proceso complejo en el que intervienen múltiples factores; tal como se describe en el modelo utilizado por esta investigación, la variabilidad de cada factor hace que la relación existente sea mucho más compleja.



La escorrentía constituye una de las mayores pérdidas en el balance hídrico de la Zona Testigo (ZT), ascendiendo a 428,86 mm/año que representan el 34,20 % de la precipitación incidente. Al presentar esta zona escasa cobertura

vegetal propicia que el tiempo de contacto entre suelo – agua sea mínimo, además de la inexistencia de grietas en el suelo, que se originan por acción de las raíces, imposibilitando una mayor infiltración produciéndose enormes pérdidas por escurrimiento, asimismo otro factor determinante es que la textura del suelo presente en esta zona al ser Areno - francosa, afecta la tasa de infiltración y el valor de capacidad de campo, el cual al ser bajo ocasiona una saturación del suelo con mayor facilidad, (Custodio y Llamas, 2001). Siendo estos resultados afines a los obtenidos por Blanco Rojas (2010) quien concluye que las áreas con escasa cobertura vegetal, presentan una menor capacidad para almacenar la humedad, teniendo la cubierta vegetal más incidencia positiva en la recarga hídrica ya que disminuye considerablemente las pérdidas por escorrentía. Asimismo Ávalos Cambranes (2008) manifiesta que las zonas catalogadas de baja recarga en su investigación corresponde en su mayoría a áreas sin cobertura vegetal.

La tasa de escurrimiento en la ZE – 1 es del 3,44 %, siendo la ZE – 2 la zona que menor perdida por escorrentía presentó ya que sólo representa el 0,44 % de la precipitación anual, ello atribuible a que ambas zonas presentan una alta capacidad de infiltración y almacenamiento de la humedad, siendo la presencia de cobertura vegetal determinante para que estas pérdidas no sean significativas en el balance hídrico. Reflejando de esta manera la importancia de conservar este tipo de cubierta, ya que si un área forestal es reemplazada por pastizales o cultivos es muy probable que se produzca un incremento de la escorrentía superficial, así como una reducción considerable en las tasas de intercepción, evapotranspiración y capacidad de infiltración, (Jones, 1997). Estos resultados son semejantes con los de Blanco (2010) quien concluye que las áreas cubiertas por bosque presentan mayor capacidad para acrecentar el tiempo de contacto entre la precipitación y el suelo, evitando mayores pérdidas por escorrentía y por consiguiente mayor potencial de recargar acuíferos, siendo los sustratos compuestos por árboles y pastos los que mayor incidencia

positiva presentan en el proceso de infiltración y recarga que zonas compuestas netamente por cubierta herbácea. (Ríos, Andrade e Ibrahim, 2008).

### 4.3 Contratación de Hipótesis

Null hypothesis : All means are equal  
 Alternative hypothesis : At least one mean is different  
 Significance level :  $\alpha = 0,05$

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	3	ZT; ZE-1; ZE-2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	9487	4743	3,34	0,048
Error	33	46898	1421		
Total	35	56385			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
37,6982	16,83%	11,78%	1,01%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
ZT	12	6,33	10,02	(-15,81; 28,47)
ZE-1	12	38,3	43,1	( 16,1; 60,4)
ZE-2	12	42,8	48,0	( 20,7; 65,0)

Pooled StDev = 37,6982

P-values <  $\alpha$

0,048 < 0,05

Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Se concluye que al menos una de las medias es estadísticamente diferente en relación a un solo factor (presencia de *Polylepis Racemosa*); es decir se comprueba que la presencia de plantaciones de *Polylepis Racemosa* influyen significativamente en la generación de recarga hídrica.

## CONCLUSIONES

- Se determinó que las plantaciones de *Polylepis racemosa* influyen significativamente y se correlacionan directamente con el proceso de recarga, mediante la siguiente ecuación  $y = 5,6336x - 146,88$  y un  $R^2$  equivalente a 0,7879; siendo la reforestación con esta especie una estrategia viable de recargar los acuíferos de la Subcuenca del río Shullcas y asegurar la disponibilidad de agua ante la inminente escasez hídrica por los impactos del cambio climático.
- Se estableció una relación lineal entre la recarga potencial de acuíferos y la cantidad de precipitación efectiva en la subcuenca del río Shullcas, relacionando ambas variables mediante la siguiente ecuación  $y = 0,7586x - 18,832$ , y un coeficiente de determinación igual a 0,9316.
- No se logró establecer una relación lineal entre la recarga potencial de acuíferos y la evapotranspiración real generada por las plantaciones de *Polylepis racemosa* (Quinual) y su medio en la subcuenca del río Shullcas debido a que no se presentó un ajuste significativo en el modelo lineal, obteniendo un coeficiente de determinación igual a 0,1641.
- Se estableció una relación inversa entre la recarga potencial de acuíferos y la escorrentía presente en la subcuenca del río Shullcas, ya que las zonas con presencia de cobertura vegetal registraron menores pérdidas por escorrentía y por ende un mayor volumen de recarga hídrica. A diferencia de la zona que se caracterizó por estar desprovista de vegetación en donde se registraron mayores pérdidas por escorrentía y la recarga hídrica fue mínima.

## RECOMENDACIONES

- Para obtener resultados estadísticamente más confiables sería necesario evaluar las variables en periodos más largos (3 años hidrológicos), para establecer el comportamiento de las mismas a futuro con un mayor grado de exactitud.
- Se exhorta a usar los resultados obtenidos en esta investigación como un antecedente para futuros proyectos de reforestación, por ser el *Polylepis racemosa* una especie endémica de la zona con múltiples beneficios ecosistémicos, entre los que destaca su capacidad para contribuir de manera óptima en la recarga hídrica. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación son puntuales y por lo tanto, no extrapolables a otras cuencas y coberturas vegetales.
- De igual manera, se sugiere realizar estudios que aborden diversas características del *Polylepis* para comprender su real potencial, ya que a la actualidad se cuenta con poca bibliografía sobre este género. Más aún, encontrar información específica sobre el *P. racemosa* es bastante complejo, ameritando con carácter de urgencia investigaciones que se enfoquen en esta especie por ser endémica de nuestra región y catalogada en estado de vulnerabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, Pereira, Raes, y Smith (2006). Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO).
2. Allen, R., Howell, T., Pruitt, W., Walter, I., y Jensen, M. (1991). Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. Proceedings of the International Symposium on Lysimetry (pág. 444). New York: American Society of Civil Engineers.
3. Álvarez Garretón, C. (2010). Influencia de la cobertura de bosque nativo en la generación de escorrentía en el sur de Chile: estudio comparativo de microcuencas. Chile: Universidad de Chile.
4. Andinas, P. M. (2009). Atlas de Deformaciones Cuaternarias de Los Andes. Publicación Geológica Multinacional.
5. Aparicio Mijares, F. J. (1989). "Fundamentos de Hidrología de Superficie". Mexico D.F: Limusa.
6. Arce, R. (1989). Distribución y ecología de *Polylepis*. . Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) REDINFOR, 34p.
7. Argollo, J. (2006). Botánica Económica de los Andes Centrales. La Paz: M. Moraes, B. Øllgaard, L.P. Kivst, F. Borchsenius, y H. Balslev.
8. Arocha, R. (1980). Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño). Caracas: Vegas.
9. Arroyo, A. J. (2013). "Balance hídrico superficial mediante el método del índice climático del Valle del Mantaro, 2010 al 2013". Apuntes de Ciencia y Sociedad, 6-14.
10. Aura Azócar, F., y García Núñez, C. (2007). Functional characteristics of the arborescent genus *Polylepis* along a latitudinal gradient in the high Andes . Interciencia, 663 - 668.
11. Ávalos Cambranes, O. (Julio de 2008). Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural de la subcuenca del río Belejeyá del

Municipio de Granados, Baja Verapaz. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

12. Balek, J. (1988). Groundwater Recharge Concepts. Boston: Reidel.
13. Blanco Rojas, H. (2010). Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta e las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica. Cuadernos de Investigación (UNED), 181 - 204.
14. Buytaert, Iñiguez, Celleri, Bièvre, D., Wyseure, y Deckers. (2006). Analysis of the water balance of small páramo catchments in south. Earth-Science Reviews, 53-72.
15. Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis Potosí: Universitaria Potosina.
16. Chacón Valenzuela, J. (2003). Efecto de la forestación sobre el balance hídrico en la zona del secano del centro de Chile. Chile: Universidad Austral de Chile.
17. Coutagne, A. (1954). Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La Houille Blanche, 360 - 369.
18. Cuadrat, J., y Pita, F. (1997). Climatología. Cátedra.
19. Custodio, E. (1997). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. Las Palmas de Gran Canaria: Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH).
20. Custodio, E., y Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea. Barcelona: Omega.
21. Custodio, E., y Llamas, M. (2001). Recarga Hídrica. Madrid: Mundiprensa.
22. Custodio, J., y Custodio, E. (2001). Hidrogeoquímica isotópica del macizo fonolítico de Amurga (SE de la Isla de Gran Canaria) . Las Caras del Agua Subterránea (págs. 461-468). Barcelona: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
23. Dalmayrac, B. (1978). Geologie des Andes Peruviennes.

24. De las Salas, G., y García Olmos, C. (2000). Balance Hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristobal, Bogotá. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 205-218.
25. De Vries, J., y Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: An overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 5 -17.
26. El clima y sus efectos en la vegetación. (2006). En Emck, Moreira-Muñoz, y Ritcher, *Botánica Económica de los Andes Centrales* (págs. 11 - 36). La Paz: M. Moraes R., B. Øllgaard, L. P. Kvist, F. Borchsenius y H. Balslev.
27. Emck, P. (2006). A climatology of South Ecuador. Universidad de Erlangen: Tesis PhD.
28. FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de cultivo . Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación.
29. Faustino, J. (2006). Notas de clase para el curso identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. San Salvador: CATIE.
30. Fjeldså, J. (1995). Geographical patterns of neoendemic and relict species of Andean forest birds: The significance of ecological stability areas. *New York Botanical Garden*, 89 - 102.
31. Fjeldså, J., y Kessler, M. (1996). Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodlands of the highlands of Peru and Bolivia: A contribution to sustainable natural resource management in the Andes. Copenhagen: NORDECO.
32. Flury, M., y Flühler, H. (1994). Brilliant Blue FCF as a Dye Tracer for Solute Transport Studies - A Toxicological Overview. *Environmental Quality*, 1108 - 1112.
33. Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *GroundWater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
34. Gansser, A. (1973). Facts and theories of the Andes. *Journal of the Geological Society*, 93-131.
35. Gass, I., Smith, P., y Wilson, R. (2002). *Introducción a las Ciencias de La Tierra*. Barcelona: Reverté.

36. Gliessman, S. R. (2002). Agroecología :Procesos Ecológicas en la Agricultura Sostenible. Turrialba: LITOCAT.
37. Gómez, G. C., Grijalva Santos, R., Munive Cerrón, R., Mallma Capcha, T., y Orihuela Villavicencio, C. (2014). "Evaluación de las tasas de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas". Apunt. cienc. soc, 32 - 43.
38. Gonzáles, S., y Rodriguez, U. (2013). "Conservation of a threatened *Polylepis* forest for maintain ecosystem services in Bolivia". La Paz: III Congreso Internacional Ecología y Conservación de *Polylepis* .
39. Gratzer, G., Duguma, L., y Hager, H. (2001). Sources of fresh water. En F. SDC, Mountain Forests in a Changing World: Realizing values, addressing challenges (págs. 13 - 20). FAO & SDC.
40. Healy, R. W., y Cook, P. G. (2002). Using ground-water levels to estimate. Hydrogeol Journal, 91 - 109.
41. Hendrickx, J., y Walker, G. (1997). Recharge from precipitation. En I. Simmers, Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas (págs. 19 - 111). Rotterdam: Balkema.
42. Herráiz Sarachaga, M. (1997). Conceptos Básicos de Sismología. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmica y Mitigación de Desastres.
43. Herrera I., I. (1995). Manual de Hidrología. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).
44. Herrera Ibáñez, I. (2002). Hidrogeología Práctica. Guatemala: USAC - Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hidricos.
45. Hillel, D. (1971). Soil and water: physical principles and processes. New York and London: Academic Press.
46. Hillel, D. (1980). Applications of soil physics. New York: Academic Press.
47. Huber, A., y López, D. (1993). Cambios en el Balance Hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus Radiata*, Valdivia, Chile. Bosque, 11-18.

48. Huber, A., y Trecaman, R. (2004). Respuesta del balance hídrico al raleo de una plantación joven de *Pinus radiata* en el secano interior de Chile. *Terra Latinoamericana*, 417 - 424.
49. Huber, A., Oyarzún, C., y Ellies, A. (1985). Balance Hídrico en tres plantaciones de *Pinus Radiata* y una pradera II. Humedad del Suelo y Evapotranspiración. *Bosque*, 74 - 82.
50. IICA. (1984). Elementos de Agroclimatología. San José: ORSTOM.
51. Isaac, B. (1988). Uplift of the Central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Geophys*, 3211 - 3231.
52. Johnson Division, E. (1975). "El agua subterránea y los pozos". Minnesota: Johnson Inc.
53. Kendall, C., y Caldwell, E. (1998). Fundamentals of isotope geochemistry. En C. Kendall y J. J. McDonnell, *Isotope tracers in catchment hydrology* (págs. 51 - 86). Amsterdam: Elsevier Science.
54. Kessler, M. (2006). Bosques de *Polylepis*. La Paz: M. Moraes, B. Øllgaard, L.P. Kivst, F. Borchsenius, y H. Balslev.
55. Kessler, M., y Schmidt-Lebuhn (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms, Diversity y Evolution*, 1 - 10.
56. Kraatz, D., y Mahajan, I. K. (1975). Small Hydraulic Structures. *Irrigation and Drainage*, 203- 217.
57. Lenters, J., y Cook, K. (1997). On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 656–677.
58. Lerner, D. N. (1990). General principles of techniques for estimating recharge. En D. Lerner, A. S. Issar, y I. Simmers, *Groundwater recharge* (págs. 101-228). Hannover: Heise.
59. Lerner, D. N., Issar, A. S., y Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge*. Hannover: Heise.
60. Linsley, J. (1998). *Hidrología para ingenieros*. Distrito federal, Mexico: McGraw-Hill.

61. López-Rodríguez, J. J. (1997). Medida de la recarga por lluvia: Métodos instrumentales en parcelas y trazadores. En E. Custodio, M. R. Llamas, & J. Samper, La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación Hidrológica (págs. 111- 124). Las Palmas de Gran Canaria: Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH).
62. Lvovitch, M. I. (1970). World water balance (General Report). Symposium on the world water balance (págs. 401 - 415). Wallingford: International Association of Hydrological Sciences (AIH).
63. Martínez Alfaro, P., Martínez Santos, P., y Castaño Cataño, F. (2005). Fundamentos de Hidrogeología. Madrid: Grupo Mundi Prensa.
64. Mc Morran, R., y Price, M. (2001). Why focus on the worlds mountain forest? En F. y. SDC, Mountain Forests in a Changing World: Realizing values, addressing challenges (págs. 7 -12). FAO y SDC.
65. Mc Morran, R., y Price, M. (2001). Why focus on the worlds mountain forest? En F. y. SDC, Mountain Forests in a Changing World: Realizing values, addressing challenges (págs. 7 -12). FAO y SDC.
66. Mégard, F. (1978). Etude geologique des Andes du Perou central. Contribution a l'etude geologique des Andes Mem. . ORSTOM, 1 - 86.
67. Mendoza, W., y Cano, A. (2011). Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes Peruanos. Revista peruana de biología, 197 - 200.
68. Millar, C., Turk, L., y Foth, H. (1961). Edafología: fundamentos de la ciencia del suelo. Mexico D.F.: Continental.
69. Monsalve, S. (1999). Hidrología en la Ingeniería . Mexico D.F: Alfaomega Grupo.
70. Mujica, E., y Holle, M. (2001). Los Andes y la transformación cultural del paisaje. Paisajes culturales en Los Andes (págs. 65 - 79). Lima: UNESCO.
71. Navarro García, G., y Navarro García, S. (2013). Química Agrícola: Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. España: Mundi-Prensa.
72. Nittler, J., y Barahona, R. (1993). El manejo de cuencas en el proyecto de desarrollo agrícola de Guatemala. Guatemala: MAGA.

73. Núñez Solís, J. (2000). Fundamentos de edafología . San José: EUNED.
74. Núñez Solís, J. (2001). Manejo y conservación de suelos. San José: Universidad Estatal a distancia .
75. Núñez Solís, J. (2006). Manual de Laboratorio de Edafología. San José: EUNED.
76. Orozco, E., Padilla, T., y Salguero, M. (2003). Metodología para determinación de las áreas de recarga hídrica natural. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).
77. Oyarzún, C. E., Huber, A., y Ellies, A. (1985). Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera II: humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque*, 74-82.
78. Padilla Cámbara, T. A. (2003). Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala. Costa Rica.
79. Prieto, C. J. (2004). El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Bogotá.
80. Pulido Bosch, A. (2014). Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos. Almería: Universidad de Almería.
81. Reddy, S. (1983). A simple method of estimating the soil water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1 - 17.
82. Ríos, N., Andrade, H., y Ibrahim, M. (2008). Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos. *Zootecnia Tropical*, 183-186.
83. Samper, C. J. (1997). Métodos de Evaluación de la Recarga por la Lluvia por Balance de Agua. La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica (págs. 41- 79). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
84. Sánchez Carlessi, H., y Reyes Meza, C. (1998). Metodología y Diseños de la Investigación. Lima: Mantaro.

85. Sánchez San Román, F. J. (2001). Hidrología - Hidrogeología. Recuperado el 09 de 03 de 2014, de Univerisdad de Salamanca: <http://hidrologia.usal.es>
86. Sandoval Illescas, J. (1989). Principios de Riego y Drenaje. Guatemala: USAC.
87. Santos Mancilla, E. (1997). Simulación hidrológica para la calibración de parámetros de escorrentía en la cuenca del río La Virge, San Andrés Itzapa, Chimaltenango. Guatemala: Tesis USAC.
88. Sanz Llano, J. (1975). Mecánica de Suelos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
89. Scanlon, B., Healy, R., y Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 18 - 39.
90. Schosinsky N, G. (2006). Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos. *Revista Geológica de América Central*, 13 - 30.
91. Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). Modelo Analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 43 - 55.
92. Sebrier, M. (1991). Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to the present. *Andean Magmatism and its Tectonic Setting - Sociedad Geológica de América*, 259 - 278.
93. Shaw, E. M. (1996). *Hidrology in Practice*. London: Chapman & Hall.
94. Simmers, I. (1997). Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. Rotterdam: Balkema.
95. Simpson, B. (1979). A revision of the genus *Polylepis* (Rosaceae: Sanguisorbeae). *Smithsonian Contr. Bot.*, 1 - 62.
96. Simpson, B. (1986). Speciation and specialization of *Polylepis* in The Andes. En F. Vuilleumier, y M. Monasterio, *High Altitude Biogeografía Tropical* (págs. 304 - 316). New York: Oxford University Press.
97. Somoza, R. (1988). South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 211 - 215.

98. Strecker, M., Cervený, P., Bloom, A., y Malizia, D. (1989). Late Cenozoic tectonics and landscape development in the foreland of the Andes: Northern Sierras Pampeanas. *Tectonics*, 517 - 534.
99. Suarez de Castro, F. (1979). *Conservación de suelos*. San José: IICA.
100. Thornthwaite, C. (1985). Conference on the assessment of the role of carbon dioxide and other green house gases in climate variations and associated impacts. Report of the Int. Conf. on the assessment of the role of carbon dioxide and other green house gases in climate variations and associated impact. Villach: WMO.
101. Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 55 - 94.
102. Turc, L. (1954). Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 491-595.
103. Universidad de Lleida - Departamento de medio ambiente y ciencias del suelo. (2001). *Agrometeorología*. Madrid: Grupo Mundi Prensa.
104. Valverde, J. C. (2007). *Riego y Drenaje*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
105. Vela Enríquez, M. E., y Jiménez, F. (2009). Sistemas agroforestales en áreas de recarga de agua para consumo humano en la cuenca alta del río Bobo, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 68-75.
106. Velasco Velasco, I. (1979). *Aspectos generales de la hidráulica de pozos*. Chapingo: Univeridad Autónoma de Chapingo .
107. Villón, M. (2004). *Hidrología*. Instituto tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 386 p. Cartago: CR.
108. Ward, R., y Robinson, M. (1989). *Principles of Hidrology*. London: McGraw-Hill.
109. Zavaleta Huerta, E., Cruz-Jiménez, H., y Márquez Ramírez, J. (2012). Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. *Foresta Veracruzana*, 23-28.

## LINCOGRAFÍA

1. House of Water and Environment. (2004). Recuperado el 10 de Mayo de 2014, de <http://www.hwe.org.ps/Education/Birzeit/GroundwaterEngineering/Chapter%204%20-%20Groundwater%20Potential%20and%20Discharge%20Areas.pdf>

# ANEXOS

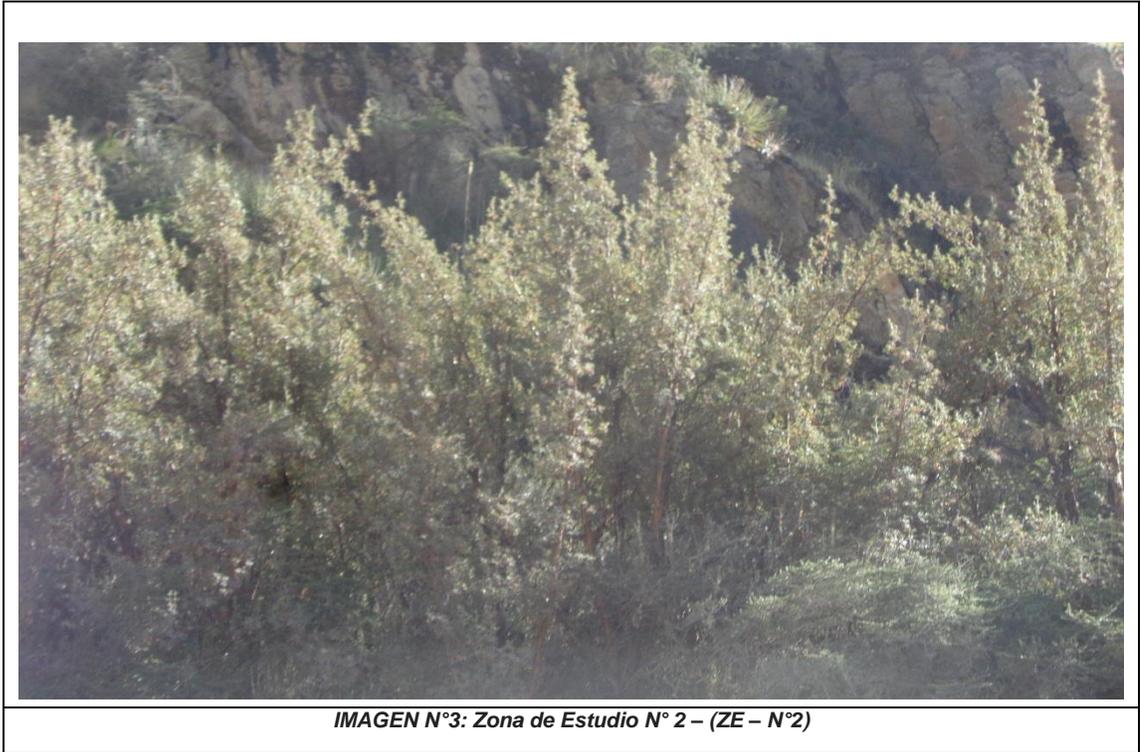
## 1. Imágenes del desarrollo de la investigación



*IMAGEN N°1: Zona Testigo*



*IMAGEN N°2: Zona de Estudio N° 1 – (ZE – N°1)*



**IMAGEN N°3: Zona de Estudio N° 2 – (ZE – N°2)**



**IMAGEN N°4: Delimitación de zonas de estudio**





**IMAGEN N°7: Horizontes de la calicata de la Zona de estudio N°2**



**IMAGEN N°8: Muestra de la zona de estudio rotulada para ser enviada al Laboratorio de Suelos de la UNALM**



*IMAGEN N°9: Prueba de infiltración realizada en campo utilizando el Método de Porchet*

## 2. Reportes de Laboratorio de Suelos – Universidad Agraria La Molina

### A. Análisis de Granulometría

# INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : CARE PERU  
PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ SUBCUENCA DEL SHULLCAS  
REFERENCIA : H.R. 44339  
FACTURA : 26228  
FECHA : 03/08/2014

Número Muestra		% Arena muy Gruesa 2.00 - 1.00mm.	% Arena Gruesa 1.00 - 0.50mm.	% Arena Media 0.50 - 0.25mm.	% Arena Fina 0.25 - 0.10mm.	% Arena Muy Fina 0.10 - 0.05mm.	% Limo	% Arcilla
Lab	Claves							
1401	ZT / Zona Testigo	19,14	15,66	11,90	18,88	12,58	12,08	9,76
1402	ZE- 1 / Zona de Estudio N° 1	17,52	18,24	14,60	10,32	13,58	18,02	7,72
1403	ZE- 2 / Zona de Estudio N° 2	24,08	21,44	16,06	8,18	4,02	19,98	6,24

*Dr. Sady García Bendezú*  
*Jefe del Laboratorio*

## B. Análisis de Propiedades del Suelo

# INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : CARE PERU

PROCEDENCIA : JUNIN/ HUANCAYO/ SUBCUENCA DEL SHULLCAS

REFERENCIA : H.R. 46354

FACTURA : 26228

FECHA : 03/08/2014

Número Muestra		D.A. g/cm <sup>3</sup>	C.C. %	P.M. %	M.O. %	Humedad Inicial %
Lab	Claves					
3231	ZT / Zona Testigo	1,82	8,96	4,05	2,73	4,66
3233	ZE - 1 / Zona de Estudio N° 1	0,76	37,34	23,13	10,70	37,31
3234	ZE - 2 / Zona de Estudio N° 2	0,99	33,15	20,19	7,14	23,82

*Dr. Sady García Bendezú*  
*Jefe del Laboratorio*

### 3. Fichas de Campo

#### A. Fichas de Delimitación de Parcelas e Inventario de Especies en la ZE – 1

FICHA DE DELIMITACIÓN DE PARCELAS E INVENTARIO DE ESPECIES					
ZONA	ZONA DE ESTUDIO MAR J			FECHA	25-09-14
INVESTIGADORA	Camarena Villanueva Claudia				
UBICACIÓN	LOCALIDAD	HUACHIPA - ROMORA			
	DISTRITO	ACAPALCO - VILCACAYO			
	PROVINCIA	HUACHACO.			
	REGIÓN	ATAJUN			
DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO					
EXTENSIÓN DE LA PARCELA DELIMITADA			20 x 20 m.		
DATOS GEOGRÁFICOS	UTM	VÉRTICE 1	VÉRTICE 2	VÉRTICE 3	VÉRTICE 4
		491979 E 3676752 N	491971 E 3676730 N	491929 E 3676728 N	491986 E 3676746 N
	ALTITUD	4338 msnnm	4332 msnnm	4341 msnnm	4343 msnnm
INVENTARIO DE ESPECIES					
ESPECIE INVENTARIADA	GÉNERO	FOLICLOS		NOMBRE COMÚN	DIMENSIONES
	FAMILIA	RACEPILOA			
QRV531 38,7 cm	QRV538 57 cm	QRV539 -	QRV540 -	QRV541 44 cm	QRV542 -
QRV536 24 cm	QRV535 10 cm	QRV534 37 cm	QRV533 51 cm	QRV532 43 cm	QRV531 -
QRV525 33 cm	QRV526 21,5 cm	QRV521 37,7 cm	QRV528 18,9 cm	QRV529 42 cm	QRV530 44,5 cm
QRV524 20,5 cm	QRV523 18,5 cm	QRV522 23 cm	QRV521 44 cm	QRV520 24 cm	QRV519 23,3 cm
QRV513 -	QRV514 36,5 cm	QRV515 32 cm	QRV516 54,2 cm	QRV517 41,5 cm	QRV518 -
QRV512 24 cm	QRV511 -	QRV510 16 cm	QRV509 31,2 cm	QRV508 61 cm	QRV507 15 cm
QRV501 24 cm	QRV502 -	QRV503 -	QRV504 26 cm	QRV505 32,5 cm	QRV506 29,5 cm
N° DE INDIVIDUOS	QUINUALES VIVOS		33		% DE COBERTURA DE ESPECIE
	QUINUALES MUERTOS		8		
	OTRAS ESPECIES (PINOS)		1		
	TOTAL DE ESPECIES		42		
				38,57 %	
				19,05 %	
				2,38 %	
				100 %	
EDAD		ESTADO FENOLÓGICO		EXPOSICIÓN	
Plántula	<input checked="" type="checkbox"/> 5 AÑOS	Vegetativa	<input checked="" type="checkbox"/> y	Umbrío	<input type="checkbox"/>
Juvenil	<input type="checkbox"/>	Floración	<input type="checkbox"/>	Solano	<input checked="" type="checkbox"/>
Reproducción	<input type="checkbox"/>	Fructificación	<input type="checkbox"/>	Protegido	<input type="checkbox"/>
		Postdispersión	<input type="checkbox"/>	Escazo	<input type="checkbox"/>
				Fuerte	<input checked="" type="checkbox"/>

**B. Fichas de Delimitación de Parcelas e Inventario de Especies en la ZE – 2**

FICHA DE DELIMITACIÓN DE PARCELAS E INVENTARIO DE ESPECIES									
ZONA			ZONA DE ESTUDIO ARO 2			FECHA		06-06-14	
INVESTIGADORA			Camarena Villanueva Claudia						
UBICACIÓN			LOCALIDAD			ACOBACHA - CHANISERA			
			DISTRITO			VILCAKOTO			
			PROVINCIA			HUÁNUCO			
			REGIÓN			JUNÍN			
DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO									
EXTENSIÓN DE LA PARCELA DELIMITADA									
			VÉRTICE 1	VÉRTICE 2	VÉRTICE 3	VÉRTICE 4			
DATOS GEOGRÁFICOS		UTM	435600 E	435674 E	435676 E	435665 E			
			3679342 N	3679343 N	3679344 N	3679352 N			
		ALTITUD	3700 msnnm	3702 msnnm	3601 msnnm	3692 msnnm			
INVENTARIO DE ESPECIES									
ESPECIE INVENTARIADA			GÉNERO		POLLEPIS		NOMBRE COMÚN		ELEVACION
			FAMILIA		RINOMORFIA				
Q	Q	Q	Q	Q	OE	Q	OE	Q	
9,4m	5,7m	9,8m	10,7m	3,6m	0,5m	11m	0,75m	10,3m	
Q	Q	Q	Q	OE	Q	Q	OE	OE	
9m	9,6m	9,1m	10,2m	1,00m	10,8m	9,7m	1,93m	1,20m	
Q	Q	Q	Q	Q	Q	OE	OE	OE	
8,6m	10,4m	5,7m	7,9m	9,85m	9,4m	0,9m	20m	0,85m	
Q	Q	OE	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
3m	3,5m	1,45m	5,8m	10,4m	9m	5,5m	3,9m	9,5m	
Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
7,9m	4,7m	9,2m	3,3m	9m	7,6m	5,3m	9,2m	3,4m	
OE	Q	Q	Q	Q	Q	Q	OE	Q	
6,6m	3,8m	9,8m	10,5m	3,1m	2,8m	9,7m	0,8m	10,2m	
Q	Q	Q	Q	Q	Q	OE	Q	Q	
9,1m	8,6m	9m	7,6m	9,7m	3,3m	7,9m	8m	4,6m	
Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	OE	
8,7m	9,1m	9,5m	9,4m	3,7m	9,5m	6,4m	9,8m	1,52m	
Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
3,3m	1,9m	9,3m	9m	7,1m	5,4m	6,9m	6,7m	7,5m	
OE	OE	OE	OE	Q	OE	Q	Q	Q	
1,10m	1,20m	0,8m	1,5m	6,5m	1,3m	1,55m	1,5m	6,2m	
Nº DE INDIVIDUOS			QUINUALES VIVOS		15		% DE COBERTURA DE ESPECIE		82%
			QUINUALES MUERTOS		-				-
			OTRAS ESPECIES (PIMOS) B-V		17				18%
			TOTAL DE ESPECIES		92				100%
EDAD			ESTADO FENOLÓGICO		EXPOSICIÓN		VIENTO		
Plántula	<input type="checkbox"/>	10 AÑOS AÑOS	Vegetativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Umbría	<input checked="" type="checkbox"/>	Protegido	<input checked="" type="checkbox"/>	
Juvenil	<input checked="" type="checkbox"/>		Floración	<input type="checkbox"/>	Salina	<input type="checkbox"/>	Escasa	<input type="checkbox"/>	
Reproducción	<input checked="" type="checkbox"/>		Fructificación	<input type="checkbox"/>			Fuerte	<input type="checkbox"/>	
			Postdispersion	<input type="checkbox"/>					

OBSERVACIONES: PRESENCIA DE UNA ESPECIE DE HELECHO CONOCIDO EN LA ZONA BAJO EL NOMBRE DE 'BARBA DE VIEJO'

### C. Ficha de Caracterización de Tipo de Suelo en la ZE – 1

FICHA DE CARACTERIZACIÓN DE TIPO DE SUELO				
ZONA	ZONA DE ESTUDIO AROJ		FECHA	23-05-14
INVESTIGADORA	Camarena Villanueva Claudia			
UBICACIÓN	LOCALIDAD	ACUÑA - AROJ		
	DISTRITO	ACUÑA - VILCUBO		
	PROVINCIA	HUANCAYO		
	REGIÓN	JUNO		
DATOS GEOGRÁFICOS	UTM	491472 E	ALTITUD	4349 m.s.n.m
		3676737 N		
CARACTERIZACIÓN DE LA CALICATA				
DIMENSIONES DE LA CALICATA		1,20 m x 0,70 m		
HORIZONTES		DESCRIPCIÓN		
HO		EL HORIZONTE 'O' PRESENTA UNA PROFUNDIDAD DE 5 CM APROXIMADAMENTE. ESTE HORIZONTE EVIDENCIA LA PRESENCIA DE RAÍCES.		
HA		EL HORIZONTE 'A' TIENE UNA PROFUNDIDAD DE 12 CM, PRESENTA UN COLOR MARRÓN OSCURO, POR ENCIMA LA PRESENCIA ABUNDANTE DE RAÍCES Y BOLAS DE HORMIGÓN TAMBIÉN.		
HB		LA PROFUNDIDAD PARA EL HORIZONTE 'B' ES DE 19 CM, PRESENTA ALGUNAS RAÍCES, EL COLOR PREDOMINANTE ES MARRÓN, DE ALGUNA MANERA SE ENCUENTRA TUCÚ DE MEDIANO TAMAÑO.		
HBC		EN EL HORIZONTE 'C' YA NO SE OBSERVA RAÍCES Y LA COLORACIÓN QUE PRESENTA ES MARRÓN CLARO DEBIDO A LA PRESENCIA DE ARELLA, LA PROFUNDIDAD QUE DE 12 CM.		
HC		SE OBSERVA QUE EL HORIZONTE 'C' ES UNA CAPA DE 33 CM APROXIMADAMENTE. EN ESTA CAPA NO SE OBSERVA RAÍCES, PREDOMINA UN COLOR AMARILLENDO CARACTERÍSTICO DE LA ARELLA.		

OBSERVACIONES : LA PROFUNDIDAD NETA DE LA CALICATA FUE 83 CM.

D. Ficha de Caracterización de Tipo de Suelo en la ZE – 2

FICHA DE CARACTERIZACIÓN DE TIPO DE SUELO				
ZONA	ZONA DE ESTUDIO NRO 2		FECHA	08-06-14
INVESTIGADORA	Camarena Villanueva Claudia			
UBICACIÓN	LOCALIDAD	ACOPACA - SHAPIZERO		
	DISTRITO	VILCAKOTO		
	PROVINCIA	HUARALIBO		
	REGIÓN	JUNO		
DATOS GEOGRÁFICOS	UTM	435874 E	ALTITUD	3703 msnm.
		867238 N		
CARACTERIZACIÓN DE LA CALICATA				
DIMENSIONES DE LA CALICATA		1,20 m x 0,70 m.		
HORIZONTES		DESCRIPCIÓN		
HO		EL HORIZONTE 'O' PRESENTA UNA PROFUNDIDAD DE 4,5 m. PRESENTA UN COLOR MARRÓN OSCURO Y LA PRESENCIA ABUNDANTE DE RAÍCES. EN LA PARTE SUPERIOR SE OBSERVA HUYRADO DE POLVIERO.		
HA		EL HORIZONTE 'A' PRESENTA UNA PROFUNDIDAD DE 47 cm., UN COLOR MARRÓN OSCURO, ASÍ COMO LA PRESENCIA DE RAÍCES.		
HAB		ESTE HORIZONTE TIENE UN ESPESOR DE 35,5 cm. SE COMPROBÓ QUE EN SU HAYA PRESENCIA DE RAÍCES Y UN POCO DE TIERRA PULVEROSA CON COLOR MARRÓN. TAMBIÉN SE OBSERVA QUE A ESTA PROFUNDIDAD EL MATERIAL SE OBSERVA HÚMEDO.		

OBSERVACIONES: PROFUNDIDAD NETA DE LA CALICATA 90 cm.

#### 4. Tablas de Infiltración

**TABLA N° 53: Cálculo de la Infiltración Básica en la Zona Testigo (ZT)**

TIEMPO (min)	TIEMPO (día)	INFILTRACIÓN (mm/día)
0	0	0.000
5	0.003	363.537
10	0.007	230.609
15	0.010	178.989
20	0.014	153.835
25	0.017	146.962
30	0.021	136.293
35	0.024	128.011
40	0.028	119.654
45	0.031	101.216
50	0.035	90.170
55	0.038	71.518
60	0.042	65.348
64	0.044	78.660

**TABLA N° 54: Cálculo de la Infiltración Básica en la Zona de Estudio N°1 (ZE-1)**

TIEMPO (min)	TIEMPO (día)	INFILTRACIÓN (mm/día)
0	0	0
1	0.00069	648.639
2	0.00139	509.577
3	0.00208	483.868
4	0.00278	451.242
5	0.00347	411.654
7	0.00486	392.494
9	0.00625	376.916
11	0.00764	333.870
14	0.00972	305.462
17	0.01181	293.000
20	0.01389	252.753
24	0.01667	243.965
28	0.01944	224.171
32	0.02222	174.419
36	0.02500	139.942
40	0.02778	122.747
45	0.03125	115.316
50	0.03472	108.566
55	0.03819	81.957
60	0.04167	76.445
68	0.04722	68.275
75	0.05208	63.988
83	0.05764	60.564
90	0.06250	57.118

**TABLA N° 55: Cálculo de la Infiltración Básica en la Zona de Estudio N°2 (ZE-2)**

TIEMPO (min)	TIEMPO (día)	INFILTRACIÓN (mm/día)
0	0	0
1	0.00069	559.674
2	0.00139	520.021
3	0.00208	507.542
4	0.00278	488.089
5	0.00347	482.297
7	0.00486	466.598
9	0.00625	451.230
11	0.00764	418.200
14	0.00972	396.824
17	0.01181	375.490
20	0.01389	353.809
24	0.01667	338.001
28	0.01944	322.175
32	0.02222	306.052
36	0.02500	307.796
40	0.02778	291.302
45	0.03125	278.380
50	0.03472	250.606
55	0.03819	222.337
60	0.04167	193.622
68	0.04722	177.848
75	0.05208	172.206
83	0.05764	151.526
90	0.06250	130.520
95	0.06597	106.950
100	0.06944	76.555
105	0.07292	45.998