

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“Evaluación del Efecto del Cambio Climático sobre la Disponibilidad
Hídrica en la Cuenca Alta y Media del Río Jequetepeque”**

Presentado por:

Renny Daniel Díaz Aguilar

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

LIMA-PERÚ

2014

ÍNDICE

I	INTRODUCCION	1
II	REVISION LITERARIA	3
	2.1. CAMBIO CLIMÁTICO	3
	2.1.1. CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	3
	2.1.2. CAMBIO CLIMÁTICO EN PERÚ Y EN LA CUENCA DEL JEQUETEPEQUE	4
	2.1.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS RECURSOS HÍDRICOS	9
	2.1.4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS	9
	2.1.5. DESARROLLO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	9
	2.1.6. LÍNEA DE BASE DEL CLIMA	11
	2.1.7. ESCENARIOS DE EMISIONES	12
	2.2. LOS MODELOS CLIMÁTICOS	15
	2.2.1. TÉCNICAS DE REGIONALIZACIÓN	16
	2.2.2. MODELO CLIMÁTICO REGIONAL (MCR)	17
	2.2.3. MODELO CLIMATICO REGIONAL PRECIS	17
	2.2.4. INCERTIDUMBRES EN LOS ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	19
	2.3. MODELOS HIDROLÓGICOS	20
	2.3.1. CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	21
	2.3.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFIC	23
	2.3.3. MODELOS HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	24
	2.3.4. MODELOS HIDROLÓGICOS Y EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO	25
	2.3.5. SELECCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	25
	2.3.6. EL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)	26
	2.3.7. EXPERIENCIAS CON EL MODELO SWAT	36
	2.3.8. EL SWAT, CONCENTRACIONES DE CO ₂ Y SU EFECTO DE SOBRE LAS PLANTAS	38
	2.4. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	40
	2.4.1. UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RIO JEQUETEPEQUE	40
	2.4.2. CLIMA	40
	2.4.3. GEOMORFOLOGÍA	44
	2.4.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	46
	2.4.5. COBERTURA DE TIERRAS Y USO ACTUAL DE TIERRAS	48
III	MATERIALES Y MÉTODOS	50
	3.1. MATERIALES	50
	3.1.1. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	50
	3.1.2. INFORMACIÓN CLIMÁTICA	50
	3.1.3. SOFTWARE	52
	3.1.4. HARDWARE	52
	3.2. METODOLOGIA	52
	3.2.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	52
	3.2.2. VALIDACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS	70
	3.2.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	74

IV	RESULTADOS	81
	4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	81
	4.1.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	81
	4.1.2. TIPOS DE SUELO	82
	4.1.3. USO ACTUAL DE LA TIERRA	84
	4.1.4. MAPA DE PENDIENTES	85
	4.1.5. DATOS METEOROLÓGICOS	87
	4.1.6. EJECUCIÓN DEL MODELO ARCSWAT	88
	4.2. VALIDACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	93
	4.2.1. VALIDACION DE LA PRECIPITACION	93
	4.2.2. VALIDACIÓN DES LAS TEMPERATURA MÁXIMAS Y MÍNIMAS	96
	4.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	98
	4.3.1. CORRECCIÓN DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	98
	4.3.2. ESCENARIO CLIMÁTICO FUTURO	99
	4.3.3. PROYECCIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO	108
	4.3.4. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	110
	4.1.1. INCERTIDUMBRES EN EL ESTUDIO	120
V	CONCLUSIONES	121
VI	RECOMENDACIONES	122
VII	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	124
	ANEXOS	133

ÍNDICE DE GRAFICAS

Figura 1	<i>Distribución temporal de la precipitación total anual para las estaciones de Sondorillo (costa norte), Juancito (selva norte), Huayao (sierra central) y Puno (sierra sur). Líneas rojas indican tendencias lineales, (P=precipitación)</i>	7
Figura 2	<i>Distribución temporal de la temperatura máxima y mínima media anual de las estaciones de Moyobamba (selva norte), Matucana (sierra central) y Puno (sierra sur). Líneas rojas indican tendencias lineales, (T=temperatura)</i>	8
Figura 3	<i>Esquema de las dimensiones involucradas en los cuatro escenarios de emisiones propuestos por el IPCC</i>	13
Figura 4	<i>Emisiones globales de carbono para cuatro escenarios para el periodo 2000-2100</i>	14
Figura 5	<i>Concentraciones de dióxido de carbono para el periodo 2000-2100</i>	14
Figura 6	<i>Diagrama de clasificación de modelos según Chow, et al., (1994)</i>	23
Figura 7	<i>Representación esquemática del ciclo hidrológico según Neitsch et al., 2002</i>	28
Figura 8	<i>Mapa de ubicación geográfica de la Cuenca del Jequetepeque</i>	40
Figura 9	<i>Relación entre precipitación total anual y altitud en m.s.n.m</i>	41
Figura 10	<i>Variación mensual de las temperaturas máximas</i>	42
Figura 11	<i>Variación mensual de las temperaturas mínimas</i>	43
Figura 12	<i>Variación mensual de la precipitación media para la cuenca del Jequetepeque</i>	44
Figura 13	<i>Mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas para la Cuenca del Jequetepeque</i>	60
Figura 14	<i>Diagrama de flujo del Modelo ArcSWAT</i>	61
Figura 15	<i>Interface de Watershed Delineation</i>	62
Figura 16	<i>Delimitación de la Cuenca y sub cuencas</i>	63
Figura 17	<i>Interface Land Use/Soils/Slope Definition</i>	63
Figura 18	<i>Interface Slope Definition</i>	64
Figura 19	<i>Interface HRU Definition</i>	65
Figura 20	<i>Interface Weather Data Definition</i>	66
Figura 21	<i>Diagrama de proyecciones del modelo climático PRECIS</i>	71
Figura 22	<i>Precipitación promedio diaria para cada mes proyectada e interpolada por el CPTEC-INPE al 2100</i>	71
Figura 23	<i>Promedios de precipitación diaria proyectada por el CPTEC-INPE al 2100 para el área de estudio</i>	76
Figura 24	<i>Variación de la concentración de CO₂ para los escenarios A2 y B2</i>	79
Figura 25	<i>Mapa de modelo digital de elevación</i>	81
Figura 26	<i>Mapa de tipos de suelos para la cuenca del Jequetepeque.</i>	83
Figura 27	<i>Mapa de uso actual de tierras para la cuenca del Jequetepeque.</i>	85
Figura 28	<i>Mapa de pendientes para la cuenca del Jequetepeque</i>	86
Figura 29	<i>Mapa de delimitación de la cuenca en sub-cuencas</i>	88
Figura 30	<i>Comparación de caudales mensuales observados y simulados para el periodo de calibración.</i>	90
Figura 31	<i>Coefficientes de R² y NSE para caudales observados con respecto a los simulados para el periodo de calibración</i>	91
Figura 32	<i>Comparación de caudales mensuales observados y simulados para el periodo de validación</i>	92
Figura 33	<i>Coefficientes de R² y NSE para caudales observados con respecto a los simulados para el periodo de validación</i>	92

<i>Figura 34</i>	<i>Comparación de precipitación observada y precipitación simulada</i>	<i>95</i>
<i>Figura 35</i>	<i>Comparación de temperaturas máximas, mínimas observadas y simuladas</i>	<i>97</i>
<i>Figura 36</i>	<i>Promedios de precipitación diaria para las cuatro grillas interpoladas linealmente al 2100</i>	<i>98</i>
<i>Figura 37</i>	<i>Cambio de la precipitación futura para los escenarios A2 y B2, con interpolación lineal</i>	<i>101</i>
<i>Figura 38</i>	<i>Cambio de la precipitación futura para los escenarios A2 y B2 con interpolación del CPTEC-INPE</i>	<i>102</i>
<i>Figura 39</i>	<i>Cambio de temperatura máxima futura para los escenarios A2 y B2 con interpolación lineal</i>	<i>104</i>
<i>Figura 40</i>	<i>Cambio de temperatura máxima futura para los escenarios A2 y B2 con interpolación del CPTEC-INPE</i>	<i>105</i>
<i>Figura 41</i>	<i>Cambio de temperatura mínima futura para los escenarios A2 y B2 con interpolación lineal</i>	<i>106</i>
<i>Figura 42</i>	<i>Cambio de la temperatura mínima futura para los escenarios A2 y B2 con interpolación del CPTEC-INPE</i>	<i>107</i>
<i>Figura 43</i>	<i>Impactos de las variaciones de CO₂ sobre: evapotranspiración potencial, real, producción de agua y flujo base</i>	<i>109</i>
<i>Figura 44</i>	<i>Variación de caudales futura para los escenarios A2 y B2 interpolados de manera lineal</i>	<i>111</i>
<i>Figura 45</i>	<i>Variación de caudales futura para los escenarios A2 y B2 interpolados por el CPTEC-INPE</i>	<i>112</i>
<i>Figura 46</i>	<i>Variación del flujo base futura para los escenarios A2 y B2 interpolados linealmente</i>	<i>113</i>
<i>Figura 47</i>	<i>Variación del flujo base futura para los escenarios A2 y B2 interpolados por el CPTEC-INPE</i>	<i>114</i>
<i>Figura 48</i>	<i>Persistencias de la disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y al 95% para los escenarios A2 y B2 interpolados de manera lineal</i>	<i>118</i>
<i>Figura 49</i>	<i>Persistencias de la disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y al 95% para los escenarios A2 y B2 interpolados por el CPTEC-INPE</i>	<i>119</i>

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	<i>Relación de estaciones meteorológicas con registros diarios en la cuenca del río Jequetepeque</i>	50
Cuadro 2	<i>Estaciones Hidrométricas en la cuenca del río Jequetepeque</i>	51
Cuadro 3	<i>Relación de estaciones pluviométricas con registros mensuales en la cuenca del río Jequetepeque</i>	51
Cuadro 4	<i>Relación de estaciones meteorológica con registros mensuales en la cuenca del río Jequetepeque</i>	51
Cuadro 5	<i>Grupos hidrológicos según la conductividad del suelo</i>	54
Cuadro 6	<i>Valores medios de porosidad y densidad aparente para diferentes texturas según Rawls et al. 1992</i>	54
Cuadro 7	<i>Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelo</i>	56
Cuadro 8	<i>Uso actual del Territorio en la cuenca del Jequetepeque</i>	58
Cuadro 9	<i>Clasificación de pendientes</i>	59
Cuadro 10	<i>Descripción de parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad.</i>	68
Cuadro 11	<i>Parámetros de suelos para el modelo ArcSWAT</i>	82
Cuadro 12	<i>Tipos de suelos para la cuenca del río Jequetepeque</i>	83
Cuadro 13	<i>Uso actual de la tierra para la cuenca del río Jequetepeque.</i>	84
Cuadro 14	<i>Clasificación de pendientes para la cuenca del río Jequetepeque</i>	86
Cuadro 15	<i>Principales parámetros meteorológicos utilizados por el modelo</i>	87
Cuadro 16	<i>Ranking de parámetros de sensibilidad después de la calibración</i>	89
Cuadro 17	<i>Valores de coeficiente de correlación y significancias</i>	94
Cuadro 18	<i>Validación de la variación anual de temperatura máxima y mínima</i>	96