

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO EFICIENTE DE USO DE AGUA
DESTINADO PARA LA AGRICULTURA BASADO EN SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA IRRIGACIÓN DEL BAJO CURAL,
AREQUIPA 2018”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Quiroz Valdivia, Jonathan Andre

**para optar El Título Profesional de Ingeniero
Ambiental**

Asesor:

Dr. Blgo. Arenazas Rodriguez, Armando J.

AREQUIPA – PERÚ

2019



Universidad Católica de Santa María

☎ (51 54) 382038 Fax:(51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado:1350

AREQUIPA - PERÚ

INFORME DICTAMEN BORRADOR DE TESIS

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

“IMPLEMENTACION DE UN MODELO EFICIENTE DE USO DE AGUA DESTINADO
PARA LA AGRICULTURA BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN LA IRRIGACION
DEL BAJO CURAL, AREQUIPA 2018”

Presentado por el (los) Bachiller (es):

Jonathan Andre Quiroz Valdivia

Nuestro DICTAMEN es:

Favorable

OBSERVACIONES:

Arequipa

DICTAMINADOR

Do. Bgo. Armando Brenazas Rodriguez.
Cod. 2829.

DICTAMINADOR

Arg. Gustavo Delgado Alvarado
Cod. 2100

DICTAMINADOR

COD: 7777
ING. CP. BERLY EDINSSON CARDENAS PILLCO
Registro 169111 - BIOTECNOLOGO

AGRADECIMIENTO

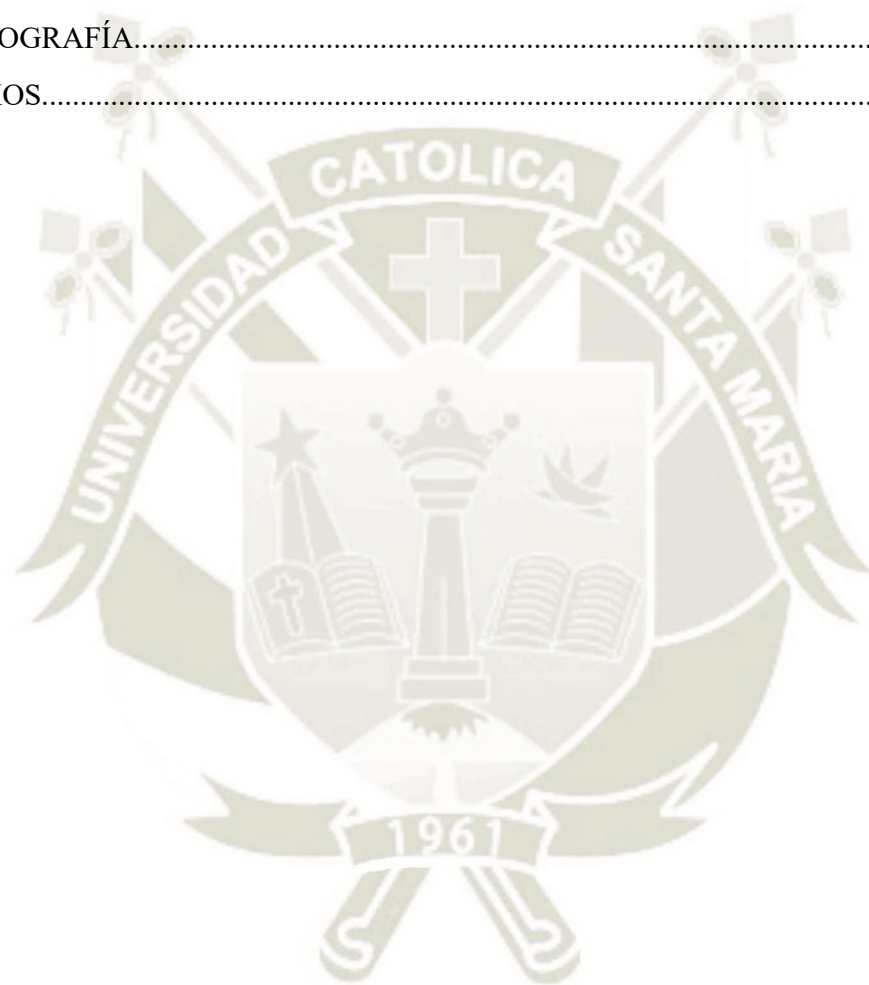
*A mi madre, porque gracias a ella soy quien soy.
A mi padre, porque siempre está ahí para apoyarme.
A mi esposa, porque el hecho de coincidir con ella en esta vida es algo de lo que viviré siempre agradecido.
A mi Ian, ya que en sus ojos y sonrisa encuentro fuerzas y ganas de superarme cada día.*

Agradezco al Dr. Armando Arenazas por su apoyo durante toda la tesis, sus consejos de vida, los académicos y su buena disposición a enseñar.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	vi
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	1
I.I. Planteamiento del problema.....	1
I.II. Antecedentes.....	2
I.III. Justificación.....	8
I.IV. Objetivos.....	10
I.V. Hipótesis.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	11
II.I. Sistemas de Información Geográfica.....	12
II.II. Teledetección.....	14
II.III. Correcciones Atmosféricas.....	20
II.IV. Precipitación Efectiva.....	23
II.V. Evapotranspiración.....	25
II.VI. Información de los cultivos.....	61
II.VII. Información del Suelo.....	64
II.VIII. Eficiencia de Riego.....	69
II.IX. Necesidades de agua en cultivos y Horarios de riego.....	74
II.X. Bases de Datos Espaciales.....	78
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	83
III.I. Descripción del Área de Estudio.....	83
III.II. Modelos de requerimiento hídrico de cultivos.....	86
III.III. Análisis de las eficiencias de riego.....	100
III.IV. Base de Datos.....	101
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	103
IV.I. Variables espaciales y físicas.....	103

IV.II. Modelos de requerimiento hídrico de cultivos.....	110
IV.III. Eficiencia sistema hidráulico.....	134
IV.IV. Base de Datos.....	140
CONCLUSIONES.....	143
RECOMENDACIONES.....	144
BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS.....	160



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de las ramas de la ciencia y tecnología de los SIG (Panigrahi, 2014)..	11
Figura 2: Clasificación del espectro electromagnético según la Longitud de Onda (Lillesand et al., 2015).....	13
Figura 3: Línea de tiempo de los satélites Landsat (NASA, 2018).....	14
Figura 4: Comparación entre las bandas de Landsat 7 y 8 (U.S. Geological Survey, 2016)	15
Figura 5: Parámetros para los 4 alcances de DOS (Song et al., 2001).....	20
Figura 6: Procesos de transporte de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Novák, 2012).....	23
Figura 7: Diagrama de Flujo del cálculo de la Radiación Superficial Neta (Faris et al., 2016).....	41
Figura 8: Balance de energía en SEBAL (Allen et al., 2011).....	42
Figura 9: Características de la humedad del suelo: a) Saturación, b) Capacidad de Campo y c) Punto de Marchitez Permanente (FAO, 1985).....	60
Figura 10: Eficiencia del Sistema de Riego (Nuñez & Hurtado, 2015).....	65
Figura 11: Esquema de la Eficiencia de Conducción (Nuñez & Hurtado, 2015).....	66
Figura 12: Diagrama de Eficiencia de Distribución (Nuñez & Hurtado, 2015).....	67
Figura 13: Eficiencia de Aplicación en % según diferentes Métodos de Riego (Nuñez & Hurtado, 2015).....	68
Figura 14: Dinámica del Balance de Agua en Cultivos (Pereira et al., 1998, p. 56).....	70
Figura 15: Esquemización del Balance de Humedad del Suelo (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2006).....	71
Figura 16: Sistema de Base de Datos Simplificado (Elmasri & Navathe, 2011).....	72
Figura 17: Bases de Datos más Usadas para el 2018 («Stack Overflow Developer Survey 2018», s. f.).....	73
Figura 18: Ubicación Política de la Irrigación Bajo Cural.....	77
Figura 19: Balance de energía para el cálculo de la radiación neta (R _n) (Waters et al., 2002).....	84
Figura 20: Proceso iterativo para el cálculo del flujo calor sensible (Waters et al., 2002)...	85

Figura 21: Punto de Muestreo de Suelo en el Lateral 7, Lote 553 de la Irrigación Bajo Cural	87
Figura 22: Parcelas de la irrigación Bajo Cural según laterales.....	95
Figura 23: Canales, tomas y bocatomas presentes en la irrigación Bajo Cural.....	97
Figura 24: Precipitación en mm/día en la estación "Huasacache".....	98
Figura 25: Rosa de viento correspondiente a la estación Huasacache.....	99
Figura 26: Temperatura, Temperatura de bulbo seco y Temperatura de bulbo Húmedo en la estación "Huasacache".....	100
Figura 27: Topografía de la zona de estudio y vista en 3D de la irrigación "Bajo Cural"..	101
Figura 28: Evapotranspiración de referencia diaria para la estación Huasacache en el tiempo de estudio.....	102
Figura 29: Evapotranspiración de referencia horaria como promedio mensual para las 13 horas en la estación Huasacache en el tiempo de estudio.....	103
Figura 30: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/06/02, 2018/05/17 y 2018/05/01.....	105
Figura 31: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/08/05, 2018/07/04 y 2018/06/18.....	106
Figura 32: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/04/15, 2018/03/30 y 2018/03/14.....	107
Figura 33: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/01/25, 2018/01/09 y 2017/12/24.....	108
Figura 34: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/12/08, 2017/11/22 y 2017/11/06.....	109
Figura 35: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/10/21, 2017/10/05 y 2017/09/19.....	110
Figura 36: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/09/03, 2017/08/18 y 2017/08/02.....	111
Figura 37: Parcelas/Tabladas encuestadas en la irrigación Bajo Cural.....	121
Figura 38: Comparación de los requerimientos hídricos totales promedio para cada cultivo según la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith y SEBAL.....	125

Figura 39: Ubicación de los aforos realizados en los canales de los laterales 1 al 8 en la irrigación Bajo Cural..... 127

Figura 40: Comparación del área definida en el rol de riego y la de PostGIS.....133



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores promedios anuales de los componentes de la ecuación de balance de agua de la Tierra.....	24
Tabla 2: Irradiancia Solar Espectral Exoatmosférica (ESUN) de Landsat-8 OLI para las bandas 2, 3, 4, 5, 6 , 7 y 9.....	44
Tabla 3: Constantes utilizadas para Landsat 8.....	48
Tabla 4: Ubicación de la estación meteorológica Huasacache.....	79
Tabla 5: Resumen de la Infraestructura hidráulica presente en el Bajo Cural.....	96
Tabla 6: Conteo de datos registrados, promedio, desviación estándar, mínimo, máximo, percentil 25, 50, 75 en la estación "Huasacache".....	100
Tabla 7: Imágenes del satélite Landsat 8 sin nubosidad en el área de la irrigación Bajo Cural.....	104
Tabla 8: Propiedades correspondientes a la muestra de suelo de la Irrigación Bajo Cural.	112
Tabla 9: Parámetros de suelo correspondientes a la muestra de la irrigación Bajo Cural según las ecuaciones de Saxton & Rawls (2006).....	113
Tabla 10: Resumen de los agricultores encuestados, los lotes, el tipo de riego, el tiempo e intervalo de riego y los cultivos encontrados.....	114
Tabla 11: Cultivos encontrados mediante encuestas en el Bajo Cural en función de los Cultivos Objetivo según el estudio de delimitación de bloque de riego para la irrigación Bajo Cural.....	115
Tabla 12: Meses que se siembra cada cultivo identificado mediante encuestas realizadas en la Irrigación Bajo Cural.....	116
Tabla 13: Coeficientes de cultivo (kc) de los cultivos identificados para la irrigación Bajo Cural.....	117
Tabla 14: Periodos de crecimiento de los cultivos identificados para la irrigación Bajo Cural en días según.....	117
Tabla 15: Total de días de cultivos según informe de delimitación de bloque de riego, según encuestas a agricultores, factor de conversión y etapas modificadas según el factor de conversión.....	118

Tabla 16: Profundidad radicular para los cultivos de la irrigación Bajo Cural según etapas	118
Tabla 17: Fracción de agotamiento crítico para los cultivos de la zona de la irrigación Bajo Cural según etapas.....	119
Tabla 18: Volúmenes de agua requeridos por mes, total y total por mes para cada cultivo usando evapotranspiración de referencia y coeficientes de cultivo considerada por el método Penman-Monteith.....	120
Tabla 19: Volúmenes de agua requeridos por mes, total y total por mes para cada cultivo usando evapotranspiración actual considerada por el método SEBAL.....	122
Tabla 20: Requerimientos hídricos totales promedios para cada tipo de cultivo según la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith, SEBAL y los requerimientos según la licencia de la irrigación Bajo Cural.....	124
Tabla 21: Tipos, Material y estado de infraestructura hidráulica según la Junta de Usuarios de Chili Regulado.....	125
Tabla 22: Descripción de los canales presentes en los laterales 1 al 8 en la irrigación Bajo Cural.....	126
Tabla 23: Coordenadas de los puntos de aforo realizados en los canales de la irrigación Bajo Cural.....	128
Tabla 24: Puntos de muestreo en el canal principal según el canal lateral de influencia, ordenes de toma de muestra y caudales aforados en el canal principal del Bajo Cural.....	129
Tabla 25: Caudales aforados en los canales principal y lateral del 1 al 8.....	130
Tabla 26: Estadísticos descriptivos para las áreas establecidas según el rol de riego y las definidas por PostGIS.....	133

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación II.1: Cálculo de la radiancia espectral para Landsat 8.....	15
Ecuación II.2: Cálculo de la reflectancia espectral para Landsat 8.....	16
Ecuación II.3: Cálculo de la temperatura de brillo para Landsat 8.....	16
Ecuación II.4: Cálculo de la reflectancia atmosférica superficial.....	19
Ecuación II.5: Cálculo de la radiancia espectral atmosférica dispersada.....	19
Ecuación II.6: Cálculo de la radiancia mínima.....	20
Ecuación II.7: Cálculo de la radiancia de objeto oscuro.....	20
Ecuación II.8: Cálculo de la precipitación efectiva según USDA-SCS.....	22
Ecuación II.9: Cálculo del factor de almacenamiento de agua en suelo.....	22
Ecuación II.10: Cálculo de la evapotranspiración según Penman-Monteith.....	27
Ecuación II.11: Cálculo de la evapotranspiración de referencia basado en el cultivo de pasto	27
Ecuación II.12: Cálculo de la resistencia promedio de la masa del follaje superficial.....	28
Ecuación II.13: Cálculo de la resistencia aerodinámica.....	28
Ecuación II.14: Cálculo de la altura de desplazamiento del plano cero.....	29
Ecuación II.15: Cálculo de la longitud de la rugosidad.....	29
Ecuación II.16: Cálculo de la transferencia de momento.....	29
Ecuación II.17: Cálculo del área foliar que contribuye activamente calor a la superficie y transferencia de vapor	29
Ecuación II.18: Cálculo del índice de área foliar.....	29
Ecuación II.19: Cálculo de la constante psicrométrica.....	30
Ecuación II.20: Cálculo de la presión atmosférica.....	31
Ecuación II.21: Cálculo de la presión de vapor saturada promedio.....	31
Ecuación II.22: Cálculo de la presión de vapor a una temperatura dada.....	31
Ecuación II.23: Cálculo de la pendiente de la curva de vapor de saturación.....	31
Ecuación II.24: Cálculo de la presión de vapor actual según la temperatura de bulbo húmedo y seco.....	32
Ecuación II.25: Cálculo de la constante psicrométrica del instrumento.....	32
Ecuación II.26: Cálculo de la radiación extraterrestre.....	33

Ecuación II.27: Cálculo de la distancia relativa Tierra-Sol inversa.....	33
Ecuación II.28: Cálculo de la declinación solar.....	33
Ecuación II.29: Cálculo del número de día del año.....	33
Ecuación II.30: Cálculo del ángulo de la puesta de sol.....	34
Ecuación II.31: Cálculo del número máximo de horas de sol.....	34
Ecuación II.32: Cálculo de la radiación solar.....	34
Ecuación II.33: Cálculo de la radiación solar de cielo limpio.....	35
Ecuación II.34: Cálculo de la radiación neta de onda corta.....	35
Ecuación II.35: Cálculo de la radiación neta de onda larga.....	36
Ecuación II.36: Cálculo de la radiación neta.....	37
Ecuación II.37: Cálculo del flujo de calor del suelo basado en la temperatura de un mes antes y un mes después.....	37
Ecuación II.38: Cálculo del flujo de calor del suelo basado en la temperatura del mes actual y un mes anterior.....	37
Ecuación II.39: Cálculo de la conversión de la radiación a profundidad.....	38
Ecuación II.40: Cálculo de la densidad atmosférica.....	38
Ecuación II.41: Cálculo de la temperatura virtual.....	38
Ecuación II.42: Cálculo de la evapotranspiración de referencia basado en el cultivo de pasto en periodos horarios.....	39
Ecuación II.43: Cálculo de la radiación extraterrestre.....	39
Ecuación II.44: Cálculo del ángulo de tiempo solar al inicio del periodo.....	39
Ecuación II.45: Cálculo del ángulo de tiempo solar al final del periodo.....	40
Ecuación II.46: Cálculo del ángulo de tiempo solar en el punto medio del periodo.....	40
Ecuación II.47: Cálculo de la corrección estacional para el tiempo solar.....	40
Ecuación II.48: Cálculo del parámetro para la corrección estacional.....	40
Ecuación II.49: Cálculo del balance de flujo de energía según SEBAL.....	41
Ecuación II.50: Cálculo de la radiación neta según SEBAL.....	42
Ecuación II.51: Cálculo del albedo en el tope de la atmósfera.....	43
Ecuación II.52: Cálculo del coeficiente de peso para las bandas de las imágenes multiespectrales.....	43
Ecuación II.53: Cálculo del albedo superficial.....	44

Ecuación II.54: Cálculo de la transmisividad atmosférica de onda corta.....	44
Ecuación II.55: Cálculo de la radiación de onda corta entrante según SEBAL.....	44
Ecuación II.56: Cálculo del índice de vegetación diferenciado normalizado.....	45
Ecuación II.57: Cálculo del índice de vegetación ajustado de suelo.....	45
Ecuación II.58: Cálculo del índice de área foliar basado en SAVI.....	46
Ecuación II.59: Cálculo de la emisividad superficial de onda larga y onda corta.....	46
Ecuación II.60: Cálculo de la temperatura superficial.....	46
Ecuación II.61: Cálculo del parámetro gamma para la temperatura de brillo.....	47
Ecuación II.62: Cálculo de la radiación de onda larga saliente.....	47
Ecuación II.63: Cálculo del flujo de calor sensible para el píxel frío.....	48
Ecuación II.64: Cálculo del flujo de calor sensible para el píxel caliente.....	49
Ecuación II.65: Cálculo de la radiación de onda larga entrante.....	49
Ecuación II.66: Cálculo de la emisividad atmosférica.....	49
Ecuación II.67: Cálculo de la relación del flujo de calor de suelo y la radiación neta.....	50
Ecuación II.68: Cálculo del flujo de calor sensible.....	50
Ecuación II.69: Cálculo de la diferencia de temperatura.....	51
Ecuación II.70: Cálculo de la resistencia atmosférica al transporte de vapor.....	51
Ecuación II.71: Cálculo de la velocidad de fricción.....	51
Ecuación II.72: Cálculo de la longitud de rugosidad de momento.....	52
Ecuación II.73: Cálculo de la velocidad de fricción a 200 metros.....	52
Ecuación II.74: Cálculo de la longitud de rugosidad para SEBAL.....	52
Ecuación II.75: Cálculo de la longitud de Monin-Obukhov.....	52
Ecuación II.76: Cálculo de la estabilidad atmosférica de momento y calor.....	53
Ecuación II.77: Cálculo del parámetro de estabilidad atmosférica a 200 metros.....	53
Ecuación II.78: Cálculo del parámetro de estabilidad atmosférica a 2 metros.....	53
Ecuación II.79: Cálculo del parámetro de estabilidad atmosférica a 0.1 metros.....	53
Ecuación II.80: Cálculo de la velocidad de fricción a 200 metros corregida.....	54
Ecuación II.81: Cálculo de la resistencia aerodinámica corregida.....	54
Ecuación II.82: Cálculo de la Evapotranspiración instantánea.....	54
Ecuación II.83: Cálculo del calor latente de vaporización.....	55
Ecuación II.84: Cálculo de la fracción de ET de referencia.....	55

Ecuación II.85: Cálculo de la evapotranspiración de cultivo	56
Ecuación II.86: Ecuación de la fracción de agotamiento propuesta por la FAO.....	57
Ecuación II.87: Cálculo de la humedad de suelo a 1500 kPa.....	60
Ecuación II.88: Cálculo de la densidad normal de la humedad de suelo a 33kPa.....	60
Ecuación II.89: Cálculo de la densidad normal de la humedad del suelo saturada a 33 kPa 60	
Ecuación II.90: Cálculo de la conductividad saturada del volumen de suelo.....	60
Ecuación II.91: Cálculo del agua disponible total.....	62
Ecuación II.92: Cálculo del agua fácilmente aprovechable.....	62
Ecuación II.93: Cálculo de la eficiencia de riego.....	63
Ecuación II.94: Cálculo de la eficiencia de conducción.....	64
Ecuación II.95: Cálculo de la eficiencia de distribución 107.....	65
Ecuación II.96: Cálculo de la eficiencia de distribución.....	65
Ecuación II.97: Cálculo de los requerimientos hídricos de cultivos.....	67
Ecuación II.98: Cálculo del agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo.....	68
Ecuación II.99: Cálculo del agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo simplificado.....	69
Ecuación II.100: Cálculo del valor mínimo de agotamiento.....	70

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: SOLICITUD DIRIGIDA A SENAMHI.....	133
ANEXO 2: SOLICITUD DIRIGIDA A LA JUNTA DE USUARIOS CHILI ZONA REGULADA.....	134
ANEXO 3: SOLICITUD A LA AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA.....	135
ANEXO 4: SOLICITUD A LA AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA.....	136
ANEXO 5: LÍNEAS DE COMANDO PARA EL PROCESAMIENTO DE SEBAL.....	137
ANEXO 6: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	148
ANEXO 7: ANÁLISIS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	149
ANEXO 8: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE HUMEDAD Y MATERIA ORGÁNICA..	150
ANEXO 9: RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SUELO CALCULADOS MEDIANTE LAS ECUACIONES DE SAXTON-RAWLS.....	151
ANEXO 10: FORMATO DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS.....	152
ANEXO 11: LÍNEAS DE COMANDO PARA PROCESAR LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE CULTIVO CON PENMAN-MONTEITH, EJEMPLO DEL CULTIVO “AJO”.....	153
ANEXO 12: LÍNEAS DE COMANDO PARA PROCESAR LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE CULTIVO CON SEBAL, EJEMPLO DEL CULTIVO “MAÍZ AMILACEO 1”.....	159
ANEXO 13: HOJA DE CÁLCULO CON EL PROCESAMIENTO DE PENMAN MONTEITH DIARIO.....	165
ANEXO 14: HOJA DE CÁLCULO CON EL PROCESAMIENTO DE PENMAN MONTEITH HORARIO.....	166
ANEXO 15: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS CON POSTGRESQL.....	167
ANEXO 16: FILTRACIÓN DE AGUA EN COMPUERTA Y OTROS USOS QUE SE LE DAN AL AGUA.....	171
ANEXO 17: MUESTREO DE SUELO REALIZADO EN EL LOTE 553 DEL LATERAL 7.....	172
ANEXO 18: AFOROS REALIZADOS EN LA IRRIGACIÓN BAJO CURAL.....	173

ANEXO 19: CULTIVOS IMPLEMENTADOS PARA LOS MODELOS DE
NECESIDADES HÍDRICAS EN FORMATO DE DICCIONARIOS DE PYTHON.....174

ANEXO 20: REQUERIMIENTOS HÍDRICOS PROCESADOS PARA CADA CULTIVO
SEGÚN LOS MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REFERENCIAL PENMAN-
MONTEITH Y SEBAL..... 180



RESUMEN

Las irrigaciones de la provincia de Arequipa tienen un manejo y prácticas inadecuadas con respecto a la cantidad de agua usada para irrigar los cultivos, se destaca también la ausencia de bases de datos apropiadas para los usuarios y licencias de agua en relación con lo que se cultiva. En la investigación se obtuvo volúmenes de agua necesarios por cultivos en la irrigación del Bajo Cural, esto basándose en los parámetros identificados en documentos técnicos previos y también en los cálculos de evapotranspiración de referencia y actual, pudiendo identificar las diferencias entre los efectos de ambos en los volúmenes de agua necesarios; para lograr ello se recolectó información de los usuarios, catastro agrario, infraestructura hidráulica e información meteorológica para agosto del 2017 a julio del 2018 correspondiente a nuestro tiempo de estudio, en base a ello se procedió a calcular la evapotranspiración de referencia mediante Penman-Monteith y la evapotranspiración actual mediante SEBAL procesada mediante GRASS GIS, esta fue apoyada de encuestas a los agricultores con el fin de reconocer en que puntos se sembraron los cultivos y poder extraer los valores de evapotranspiración actual, obteniendo así la demanda de agua de los cultivos, estos valores fueron analizados con las eficiencias de riego calculadas mediante aforos y finalmente se creó una base de datos que pudiera relacionar la información; según los cálculos usados con Penman-Monteith se requerirían 4485.99 mm, según SEBAL equivale a 4510.83 y el correspondiente a la licencia de bloque de riego actual equivale a 4739.65 mm, por lo que se tiene que los volúmenes estimados mediante SEBAL son más eficientes a relación de los calculados con Penman-Monteith.

Palabras Claves: Penman-Monteith, SEBAL, necesidad de agua de cultivos, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Irrigations in the province of Arequipa have inadequate management and practices with respect to the amount of water used to irrigate crops, and the absence of appropriate databases for users and water licenses in relation to what is cultivated. In the investigation, volumes of water needed for crops in the irrigation of the Bajo Cural were obtained, this has been made based on the parameters identified in previous technical documents and also in the reference and current evapotranspiration calculations, being able to identify the differences between the effects of both in the volumes of water needed; To achieve this, information was collected from users, agrarian cadastre, hydraulic infrastructure and meteorological information for August 2017 to July 2018, corresponding to our study time, based on which the reference evapotranspiration was calculated using Penman-Monteith and current evapotranspiration through SEBAL processed by GRASS GIS, this was supported by surveys to farmers in order to recognize in what points the crops were planted and to be able to extract the values of current evapotranspiration, thus obtaining the water demand of the crops, these values were analyzed with the irrigation efficiencies calculated through gauging and finally a database was created that could relate the information; according to the calculations used with Penman-Monteith, 4485.99 mm would be required, according to SEBAL it is equivalent to 4510.83 and the one corresponding to the current irrigation block license is equivalent to 4739.65 mm, so it has to be estimated that the volumes through SEBAL are more efficient in relation to of those calculated with Penman-Monteith.

Key words: Penman-Monteith, SEBAL, crop water requirements, geographic information systems.

ABREVIATURAS

AAA	Autoridad Administrativa del Agua
ADT	Agua Disponible Total
AFA	Agua Fácilmente Aprovechable
ALOS	Satélite Avanzado de Observación de la Tierra
ANA	Autoridad Nacional del Agua
ASTER	Radiómetro de Reflexión Emisión Termal Espacial Avanzado
AW3D	ALOS mundial en 3D
AW3D30	ALOS mundial en 3D de 30 metros
BOA	Fondo de la Atmósfera
BT	Temperatura de brillo
C	Arcillas
CC	Capacidad de Campo
cp	calor Específico
CWR	Necesidades Hídricas de los Cultivos
d	altura de desplazamiento del plano cero
DEM	Modelo de Elevación Digital
DN	Niveles Digitales
DOS	Técnica de sustracción de objetos oscuros
DP	Pérdidas de agua en la zona radicular
dr	Distancia Relativa inversa cuadrada de la tierra-sol
Dr	Agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo
dr	distancia Tierra-Sol
DSM	Modelo Superficial Digital
δδ	Declinación solar
ea	Presión de vapor actual
Efa	Eficiencia de aplicación
Efc	Eficiencia de conducción
Efd	Eficiencia de distribución
Efr	Eficiencia de riego
EORC	Centro de Investigación para la Observación de la Tierra
es	Presión de vapor saturada
ESA	Agencia Espacial Europea
ETa/ET	Evapotranspiración actual o real
ETc	Evapotranspiración de cultivo
Etinst	Evapotranspiración instantánea
ETM+	Mapeador Temático Mejorado plus
EtrF	Fracción de evapotranspiración de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la

	Agricultura.
G	Flujo de Calor del suelo
GMES	Monitoreo Global para el Ambiente y la Seguridad
Gsc	Constante solar
GUI	Interfáz Gráfica de Usuario
h	Altura del cultivo
H	Flujo de calor sensible
I	Lámina de riego
IGN	Instituto Geográfico Nacional
J	Número de días del año
JAXA	Agencia Japonesa de Exploración Espacial
k	Constante de von Karman's
kc	Coefficiente de cultivo
LAI	Índice de área foliar
LAIactive	Área foliar
λ	Calor latente de vaporización
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
MSS	Escáner Multiespectral
N	Duración posible máxima del sol
n	Duración de horas de sol
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio
NDSI	Índice Diferencial Normalizado de Nieve
NDVI	Índice Diferencial Normalizado de Vegetación
NDVI	Índice de Vegetación Diferenciado Normalizado
NIR	Infrarrojo cercano
OLI	Imágenes Operacionales de la tierra
OM	Materia orgánica
p	Agotamiento crítico
P	Precipitación
ETo / ETr	Evapotranspiración de referencia
PET	Evapotranspiración potencial
PMP	Punto de Marchitez Permanente
PRISM	Instrumento Pancromático de Teledetección para Mapeo Estéreo
R	Constante específica de gases
r_a	Resistencia aerodinámica
R_a	Radiación extraterrestre
r_{ah}	resistencia atmosférica al transporte de vapor
R_n	Radiación Neta
R_{nl}	Radiación neta de onda larga
R_{ns}	Radiación neta de onda corta
r_s	resistencia de la cobertura foliar

Rs	Radiación solar
Rso	Radiación solar en cielo despejado
S	Arenas
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado de Suelo
SEBAL	Algoritmo de Balance de Energía Superficial para Tierra
SIG ó GIS	Sistema de Información Geográfico
SRC	Sistema de Referencia de Coordenadas
SWIR	Infrarrojo de Onda Corta
T_{dry}	Temperatura de bulbo seco
TIRS	Sensor Termal Infrarrojo
TKv	Temperatura virtual
TM	Mapeador Temático
TOA	Tope de la Atmósfera
tsw	Transmisividad atmosférica de onda corta
Twet	Temperatura de bulbo húmedo
u*	Velocidad de fricción
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
z	Elevación sobre el nivel del mar
zh	Medida de la altura de la humedad
zm	Medida de la altura del viento
zoh	Transferencia de momento
zom	Longitud de la rugosidad
Zr	Profundidad de raíces
α	Albedo
γ	Constante psicrométrica
Δ	Pendiente de la curva de presión
ϵ	Proporción de peso molecular de vapor de agua y aire seco
θ	Ángulo de incidencia solar
ρ	Densidad atmosférica
$\rho\lambda$	Reflectividad de bandas
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ϕ	Latitud
$\omega\lambda$	Coefficiente de peso para bandas
ω_s	Ángulo de la hora de puesta de sol

INTRODUCCIÓN

La agricultura en el Perú viene dominado por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), la cual identifica como principal problema para el periodo 2007-2011 el bajo nivel de desarrollo agrario y rural (Libelula, 2011), y para el periodo 2015-2021 identifica como primera prioridad la variabilidad de las condiciones climáticas relacionadas con el suministro del recurso hídrico (MINAGRI, 2015b), adicionalmente, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) menciona que los principales problemas agrarios son los bajos niveles de rentabilidad y competitividad (FAO & CAF, 2004).

En el Perú el 93.05% de toda el agua disponible es destinado para el uso agrario (ANA, 2017), por lo que se propone la implementación de modelos eficientes de uso de agua en irrigaciones mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales cumplen un papel integrador para la gestión de resultados (Olaya, 2016). Los SIG son una herramienta importante para la administración y protección del medio ambiente sirviendo como base para la toma de decisiones (Droj, 2012), se resalta también la facilidad al realizar análisis multicriterio mediante los SIG, sirviendo así para la resolución de problemas ambientales (Jelokhani-Niaraki, Sadeghi-Niaraki, & Choi, 2018).

Estas herramientas están siendo implementadas como base en la toma de decisiones por la Unión Europea, principalmente en la agricultura para lo cual se basan en prácticas beneficiosas para el ambiente y el clima (Tóth & Kučas, 2016), por lo que el uso de algoritmos basados en balances de energía podría calcular de una más eficiente los requerimientos hídricos de los cultivos.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

I.I. Planteamiento del problema.

El uso del recurso hídrico en la cuenca Quilca - Chili está dominado principalmente por el tipo de uso agrario, siendo este uso correspondiente al 93.05% del volumen total disponible, siendo para el año 2016 equivalente a 2 766,708 hm³ (ANA, 2017), al gran volumen usado por las actividades agrícolas se le suma problemas debido a la pérdida del recurso hídrico originado por conducción, distribución y aplicación debido al deficiente estado de la infraestructura hidráulica y ausencia de mantenimiento de las mismas, además de las pérdidas de almacenamiento; originándose así la atención insuficiente a las demandas poblacionales, las demandas insatisfechas en las irrigaciones de las subcuencas no reguladas, la ineficiencia del uso, la formalización incompleta de derechos y también el cambio climático que se ve reflejado principalmente en el fenómeno del niño produciendo irregularidades en el ciclo hídrico y afectando directamente la disponibilidad hídrica en la cuenca (ANA, TYPASA, & BM, 2013). Dentro de la cuenca se encuentra el Sistema Regulado del Río Chili que cuenta con un total de 15195.32 ha de irrigación, estas se dividen en 3 Juntas de Usuarios correspondientes a la del Chili Regulado, Joya Antigua y Joya Nueva; de las cuales la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada es la que posee mayor cantidad de hectáreas destinadas a irrigación y a su vez contiene el módulo de riego más alto, estando este basado en la disponibilidad hídrica del sistema regulado, la cantidad de hectáreas de irrigación y el tipo de riego empleado en la zona (Junta de Usuarios Chili Zona Regulada, 2017), siendo esto ineficiente ya que no se consideran variables propias de la zona tales como el coeficiente de cultivo, la evapotranspiración, la precipitación efectiva, las demandas, el tipo de cultivo beneficiado y las eficiencias en general; todo ello se ve reflejado en los turnos de riego que se dan individualmente a cada lote en los cuales el módulo es uniforme para todas

las variedades de cultivo y no se considera las variables mencionadas anteriormente. Perteneciente a la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada se encuentra la irrigación del Bajo Cural, la cual contiene 1805,39 ha y 744 usuarios distribuidos en 8 laterales, siendo la irrigación más grande de la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada y a la cual se le distribuye el mayor caudal (Junta de Usuarios Chili Zona Regulada, 2017), además, en la mayoría de las irrigaciones pertenecientes al sistema regulado del Chili no se cuenta con riego tecnificado lo que incrementa la demanda del recurso hídrico identificándose el sobre riego que origina el incremento en el retorno con excesiva salinidad y el colapso de taludes (ANA et al., 2013), por lo que es necesario la implementación de modelos eficientes de riego que controlen los volúmenes de agua de acuerdo a las necesidades reales del cultivo, para permitir el uso de agua en otras actividades económicas que mejoren la calidad de vida de la región.

I.II. Antecedentes

En las cuencas del Perú, según la Ley de Recursos Hídricos se clasifican los usos como primarios, poblacionales y productivos; según publicaciones hechas por la ANA los volúmenes de uso productivo pueden ser clasificados en consuntivos y no consuntivos, dentro del uso consuntivo los mayores volúmenes se encuentran ocupados por la agricultura, siendo para el año 2016 un volumen equivalente al 31,87% de 4 184,713 hm³ totales y en la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Caplina - Ocoña se utilizó el 93,05% de agua correspondientes a un total de 2 766,708 hm³ disponibles, siendo más específicos, en la zona de estudio correspondiente a la Administración Local del Agua (ALA) Chili se utilizó un 80,45% de 653,971 hm³ disponibles como agua superficial (ANA, 2017), este caudal es el necesario para regar y en los cuales se encuentra la predominancia del

sistema de riego por gravedad el cual tiene la eficiencia de riego más baja (ANA et al., 2013)

En el departamento de Arequipa se encuentran represas para almacenar la precipitación que es frecuente e intensa únicamente en los meses correspondientes a la estación de verano, teniendo así un total de 7 represas (ANA, 2016), de las cuales únicamente 4 represas corresponden a la Cuenca Quilca – Chili sumando 285,2 MMC en total de volumen útil (ANA et al., 2013)

Dentro de la cuenca Quilca Chili se encuentra el sistema regulado del Río Chili que cuenta con un total de 15195.32 ha de irrigación, estas se dividen en 3 Juntas de Usuarios correspondientes a la del Chili Regulado, Joya Antigua y Joya Nueva; de las cuales la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada es la que tiene mayor cantidad de hectáreas destinadas a irrigación y a su vez contiene el módulo de riego más alto (Junta de Usuarios Chili Zona Regulada, 2017).

En un trabajo realizado en una región italiana se ha implementado la integración de SIG con la gestión de irrigaciones, adicionalmente se crearon escenarios de riego con el fin de saber cuántos, cómo y cuándo regar los cultivos; el alcance de esta investigación pasa por diferentes entidades y crece de acuerdo al tamaño del área de investigación, sirviendo así como un sistema de monitoreo, no siendo únicamente útil para la administración y planeamiento de las irrigaciones, si no, como una herramienta para el análisis de riesgo; todo ello fue desarrollado en base a condiciones de cultivos específicos, requerimientos de irrigación, déficit de irrigación, entre otros; siendo una de las limitaciones que se tuvo al realizar este proceso fue encontrar la información dispersa, de allí la necesidad de integrarla (Todorovic & Steduto, 2003).

En India se realizó una experiencia similar, siendo el cultivo de estudio el arroz y en la cual la demanda iba bajando de 60% para el año 1999 a 23% para el año 2000, por lo que se desarrollaron horarios de riego basados en la estimación de la evapotranspiración de cultivo (ETc), modelos de balance hídrico para variedad de cultivos y sus respectivas integraciones con SIG, adicionalmente se realizaron aplicativos en Visual Basic con los cuales se proveía una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) con el fin de evaluar demandas y ofertas, pudiendo así modelar que cultivo sería el adecuado y escogiendo el cultivo de trigo, el cual si podía satisfacer el área total de siembra (George, Raghuwanshi, & Singh, 2004).

La evaluación de escenarios también fue parte de una investigación en Taiwan, en la que se consideraron incertidumbres provocadas por la información meteorológica, por lo que se plantearon variedad de escenarios con el fin de lograr una toma de decisiones espacial, para ello se establecieron criterios para determinar complejidades de sistemas combinando futuros eventos para producir estrategias o herramientas de decisión, siendo los SIG una herramienta la cual permite evaluar el impacto visualmente y temporalmente (Tzai-Hung, Chun-Hung, Ching-Tien, & Ming-Daw, 2007).

La planificación de los recursos naturales son una herramienta que permite mejorar la toma de decisiones y analizar la información que puede estar dispersa, mejorando así las instituciones; esto es aún más importante en zonas rurales en las que los recursos naturales son la fuente de sustento de la población, por lo que los SIG son una herramienta importante ya que permite el análisis espacial y da apoyo en la modelización de los mismos para lograr una administración de calidad, por lo que son considerados una herramienta efectiva para el monitoreo (Стојановић & Манић, 2011).

Arequipa se caracteriza por ser una zona semi árida (Jiménez, Villasante, Talavera, & Villegas, s. f.), y así mismo en Iraq realizó una investigación en la que la zona de estudio contaba con escasez de agua para la irrigación, siendo el agua usualmente colectado de Sistemas de Irrigación a Gran Escala que son caracterizados por tener bajos niveles de mantenimiento, siendo la evaluación del rendimiento de estas considerada como el elemento más crítico, además se evaluaron indicadores desarrollados mediante la teledetección, entre estos indicadores se encuentra el cálculo de la evapotranspiración con el Algoritmo de Balance de Energía Superficial para Tierra (SEBAL) usando imágenes del satélite Landsat OLI, esto permitió evaluar que el agua suministrado era menor al necesitado además se menciona también que el sistema tradicional era deficiente y que existía ineficacia de las fuentes de agua al proveer el recurso hídrico (Jaber, Mansor, Pradhan, & Ahmad, 2011).

Estudios adicionales desarrollaron investigación sobre factores que influenciaban directamente los modelos de irrigación, entre los cuales se encuentran variables propias del suelo, climatológicas, del crecimiento del cultivo, de las prácticas agrícolas y características socioeconómicas, enfrentando retos en la esquematización de horarios de riego como la disponibilidad de información, la confianza de la información y la distribución temporal de la información, siendo los parámetros necesarios calculado con la ayuda de bases de datos y SIG basado en cantidades efectivas de agua (Avinash, Dubey, & Ghosh, 2014).

En ciudades áridas y semi áridas uno de los desafíos que el mundo enfrenta es la seguridad de alimento, siendo el método de irrigación superficial el responsable de la pérdida significativa de agua, por lo que existen propuestas en el mundo para desarrollar Sistemas de Administración de Información en Irrigaciones, sistemas de evaluación de recursos hídricos, aplicaciones

satelitales, SIG en la web para monitorear irrigaciones, entre otros (Elbana, Bakr, & Karajeh, 2017).

En la India se evaluó las condiciones de un terreno como irrigación, esto se realizó mediante SIG y teledetección, estas herramientas ofrecen una plataforma poderosa y conveniente que integra la complejidad espacial de los atributos de la tierra logrando un análisis adecuado de la tierra, probando ser una metodología útil para investigaciones futuras en irrigaciones que contengan infraestructura hidráulica y las que se alimenten únicamente de la lluvia, siendo las últimas las más afectadas globalmente, se destaca el problema con la dependencia de la lluvia, el cual es su impredecibilidad y distribución variada, originando que cultivos mueran por la ausencia de lluvia o sequías, originando así inseguridad en la provisión de alimento afectando directamente a los más pobres; se propone el desarrollo de la agricultura con infraestructura hidráulica, variedad en cultivos y métodos de riego adecuados; además estos métodos deberán ser evaluados de manera íntegra, georreferenciados y mapeados para un potencial de irrigación con una adecuada base de datos espacial, siendo los SIG una herramienta analítica poderosa y para la tomas de decisiones para el desarrollo de agricultura (Mandal, Dolui, & Satpathy, 2017).

Adicionalmente al uso común de SIG, viene los denominados Sistemas Integrados de Información que proveen información periódica, sistematizada y el estado para los administradores, tomadores de decisión y agencias de desarrollo; para ello se establece la creación de bases de datos espaciales la cual es una tarea complicada debido a la captura de información, la verificación y la estructuración de la base de datos (Geethika & Asadi, 2016).

En la Agenda para el Desarrollo Sustentable para el 2030 se caracterizó la Observación de la Tierra (EO), en el cual se destacó la importancia de los SIG, los cuales informan a nuestras vidas diarias y a todas las ciencias geofísicas y atmosféricas, desde predicción del clima a monitoreo de desastres naturales y la salud de ecosistemas, comunidades y ciudadanos; EO informa, localiza y provee un contexto para investigación y creación de políticas incluyendo lograr alcanzar sociedades sostenibles, esto mediante el uso de imágenes provenientes de satélites, el uso de drones para la toma de datos con mayor precisión y sensores in-situ para el Modelización y posterior verificación (Anderson, Ryan, Sonntag, Kavvada, & Friedl, 2017).

I.III. Justificación

I.III.I. Aspecto General

La aplicación de SIG permite realizar análisis espaciales y proporcionan soporte para el desarrollo de modelos destinados a la correcta gestión de recursos naturales y sobre todo lograr el desarrollo de áreas rurales, por lo que irrigaciones que cuenten con modelos eficientes de riego basados en variables climáticas, variables propias de la zona y de los cultivos acopladas al uso de Sistemas de Información Geográfica sirven para la correcta sistematización de frecuencias de riego y para la reducción del uso de agua, generando así mayor disponibilidad para el desarrollo de más actividades económicas beneficiosas para la región, por lo que esta herramienta sería de importancia para la gestión y uso eficiente de recursos.

I.III.II. Aspecto Social

En el contexto de los eventos extremos cada vez más frecuentes producto del cambio climático como es el caso de la escasez del recurso hídrico, un modelo eficiente de riego disminuiría los conflictos entre los diversos usuarios, con la consecuente mejora de la eficiencia de las entidades a cargo de la gestión y administración del agua y proporcionando, de esta manera, la distribución del recurso hídrico en función a las necesidades reales.

I.III.III. Aspecto Económico

Un adecuado y eficiente ordenamiento del aprovechamiento del recurso hídrico para los diversos usos del agua en las irrigaciones, traería consigo que las actividades económicas que generen mayores beneficios económicos para el ámbito en estudio tengan un mayor acceso al recurso

hídrico, agilizando la economía en la región en general y en particular en la Ciudad de Arequipa.

I.III.IV. Aspecto Ambiental

El uso eficiente del agua está ligado directamente con el desarrollo sostenible, así como es dispuesto en los objetivos de desarrollo sostenible (United Nations, 2015) y como se menciona en segundo lugar del Top 10 de los problemas de la humanidad para los próximos 50 años (Richard, 2003), además que el agua brinda servicios ecosistémicos de abastecimiento, regulación, apoyo y culturales; siendo a la vez un bien invaluable para el desarrollo del ser humano.

I.III.V. Aspecto Tecnológico

Los modelos eficientes de riego basados en Sistemas de Información Geográfica otorgarían a las entidades administrativas correspondientes herramientas nuevas y poderosas para la administración del recurso hídrico a nivel de cuenca hidrográfica, otorgando la oportunidad de disponer la información al público de una manera estandarizada y creando oportunidad para mayor investigación.

I.IV. Objetivos

I.IV.I. Objetivo General

Implementar un modelo eficiente de uso de agua destinado para la agricultura basado en los Sistemas de Información geográfica en la irrigación del Bajo Cural de la provincia de Arequipa.

I.IV.II. Objetivos Específicos

- Recolectar y/o georreferenciar las variables espaciales y físicas de la zona de estudio mediante el levantamiento de una base digital.
- Generar modelos de requerimiento hídrico en función de la evapotranspiración de referencia y evapotranspiración actual.
- Analizar la eficiencia de riego actual y la eficiencia de riego generada, así como la influencia en los volúmenes de agua finales.
- Establecer bases de datos que permitan administrar y manipular la información levantada.

I.V. Hipótesis

Dado que los SIG proveen herramientas espaciales que ordenan, analizan, representan, y modifican la información mediante geometrías y atributos, es probable que se obtenga un modelo de riego eficiente y se estimen los volúmenes de agua necesarios para la agricultura basado en tecnologías espaciales con el fin de lograr una adecuada gestión del recurso hídrico en la irrigación Bajo Cural.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos compilados de los últimos años con información correspondiente a la rama de los SIG, Teledetección, Correcciones Atmosféricas, Precipitación Efectiva, Evapotranspiración, Información de cultivos, Información de suelo, Eficiencia de Riego, Necesidades de cultivos y Bases de Datos Espaciales. En la Rama de SIG se detalla los fundamentos básicos y conceptos básicos de sistemas de referencias de coordenadas; en el tema de Teledetección se presentan los principios básicos de la teledetección y un resumen de los satélites principales presentados en este estudio; el tema de Correcciones Atmosféricas abarca los principales efectos ocasionados por la atmósfera en la toma de imágenes satelitales y un listado descriptivo de los principales métodos de corrección; para Precipitación Efectiva se detalla las causas de la pérdida de precipitación que no es aprovechada por la vegetación y se hace un resumen de la variedad de métodos que existen, incluyendo métodos usados por países; en Evapotranspiración se detalla los tipos de evapotranspiración, distinguiendo entre precipitación potencial y actual, así como la descripción de variedad de métodos con sus respectivas ecuaciones, tanto usando fórmulas empíricas en base a información de estaciones meteorológicas, como la usada por imágenes de satélite; para Información de cultivos se detalla las principales características necesarias para lo que es el cálculo de las necesidades hídricas; en Información de Suelos se detalle las variables principales para el balance hídrico del suelo y un listado de fórmulas empíricas para el cálculo de las mismas; en Eficiencia de Riego se detallan los tipos de eficiencia y sus respectivas consideraciones para el cálculo de los volúmenes o caudales necesarios; en Necesidades de los cultivos se detallan las ecuaciones para el balance hídrico en zona de raíces; por último en el tema de Bases de Datos Espaciales se detallan las principales bases de datos, detallando las ventajas y desventajas, y destacando a PostGIS como una potente herramienta de código abierto.

II.I. Sistemas de Información Geográfica

Un SIG es un sistema popular para procesar información espacio-temporal. Es usado como una plataforma colaborativa para la visualización, análisis y cálculos computacionales involucrando información espacio-temporal. Es usado para variedad de sistemas de soporte de decisiones y el análisis usando criterios múltiples. Ha emergido como uno de los más importantes sistemas para planeamiento operacional colaborativo y ejecución usando análisis de decisiones multicriterio involucrando la tierra, el mar y el aire; se pueden describir los SIG desde diferentes perspectivas, y estas varían dependiendo del uso que se le quiera dar (Panigrahi, 2014), las ramas de la ciencia vinculadas a los SIG se muestran en la Figura 1.

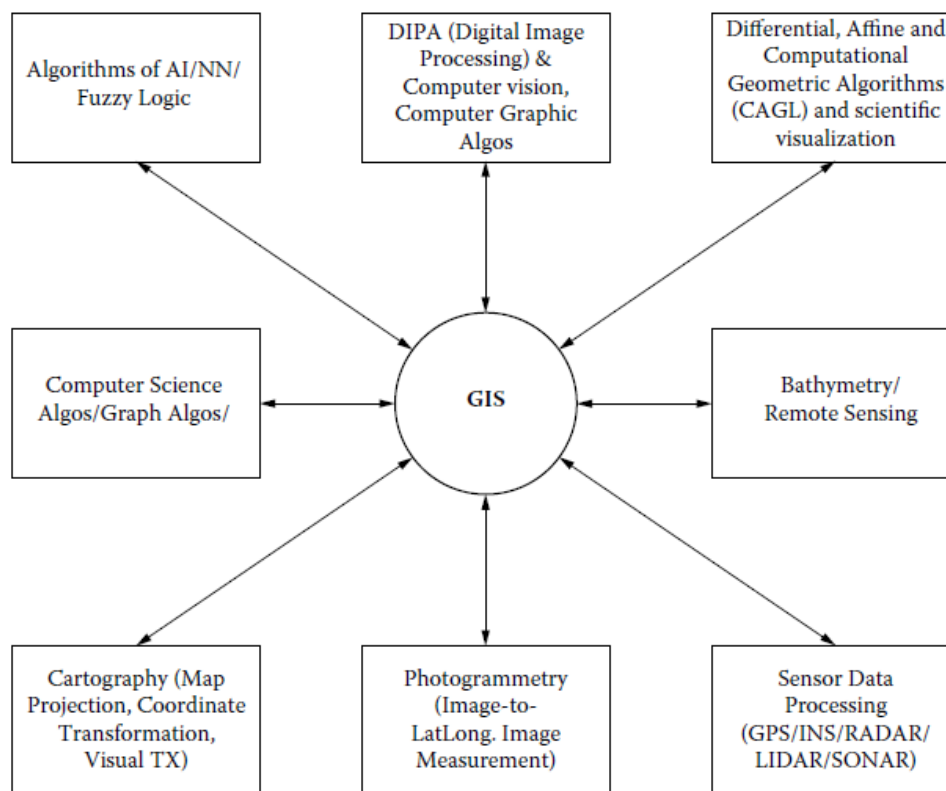


Figura 1: Diagrama de las ramas de la ciencia y tecnología de los SIG (Panigrahi, 2014)

La base de los SIG se encuentra en el Datum, sin éste las coordenadas no tienen sentido. En un Datum cada punto tiene una coordenada única y precisa, esta posición a su vez puede ser transformada en coordenadas de otro Datum. Los Datum tienen su fundamento en el sistema de coordenadas cartesiano el cual toma pares de coordenadas en un plano para lograr ubicar una posición. Para proyectar las coordenadas planas en la superficie esférica de la tierra es necesario un buen modelo de la tierra, se han propuesto diferentes teorías acerca de la forma y tamaño del planeta por mucho tiempo (Van Sickle, 2017). Un Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) está ligado a un Datum, siendo el más conocido es el WGS84. A partir de los SRC geodésico se atribuyen los SRC proyectados, las formas más comunes de presentación de las proyecciones son cilíndricas, cónicas y planas (Iliffe

& Lott, 2008). Siendo el Datum para Perú establecido por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) el Elipsoide WGS 84 (World Geodesic System 1984) y el sistema de proyección es UTM (Universal Transversal Mercaptor) estableciendo para Perú las zonas 17S, 18S y 19S (Instituto Geográfico Nacional, 2011)

II.II. Teledetección

La teledetección es la ciencia y arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través de la adquisición de información por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, se basa en la obtención de información de sensores de energía electromagnética, estos sensores obtienen información debido a que las diferentes características de la superficie de la tierra emiten y reflejan energía electromagnética. Los procesos básicos en teledetección son llamados “Adquisición de información” y “Análisis de la información” (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015). La energía electromagnética puede ser clasificada en base a su longitud de onda, frecuencia, amplitud y adicionalmente la fase de la longitud de onda (Campbell & Wynne, 2011), una representación de ello se puede visualizar en la Figura 2.

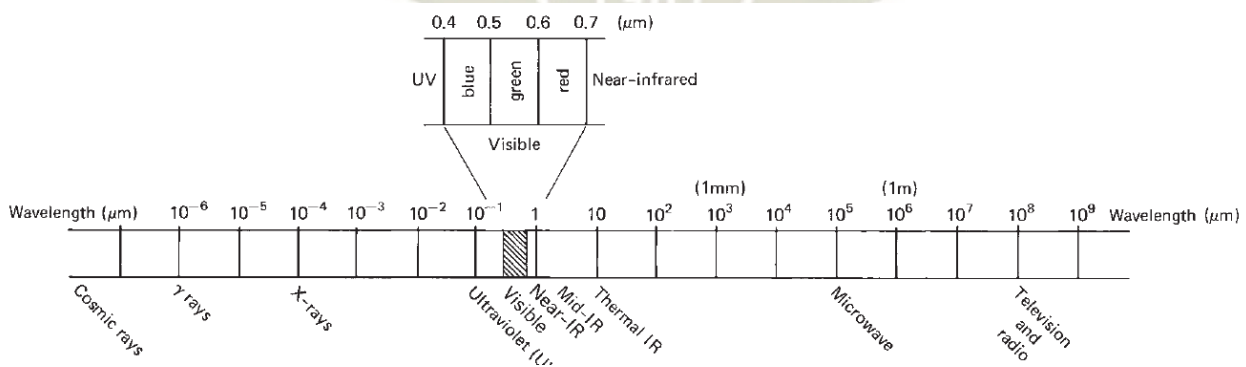


Figura 2: Clasificación del espectro electromagnético según la Longitud de Onda (Lillesand et al., 2015).

Las interacciones con la superficie se dan en el momento que la energía electromagnética llega a la superficie de la tierra, aquí debe ser reflejada, absorbida o transmitida; las proporciones en las cuales ocurre este proceso dependen de la naturaleza de la superficie, la longitud de onda de la energía y el ángulo de iluminación; siendo esto dominado por el proceso llamado Reflexión (Campbell & Wynne, 2011).

Se pueden distinguir 2 tipos de instrumentos para teledetección, los activos y pasivos. Los sensores pasivos o radió-metros miden la energía radiada (por emisión térmica) o reflejada (del sol u otro objeto radiante) por la superficie o atmósfera de la tierra. Los sensores activos tales como los radares generan su propia iluminación transmitiendo pulsos de radiación y luego usando un sistema receptor para medir la señal reflejada del área de interés (Woodhouse, 2006).

Existen variedad de misiones de satélites que proporcionan información, los cuales pueden caracterizarse por el tipo de órbita que tienen, entre los más populares se encuentran: el programa Landsat, los satélites SPOT, Sensores ópticos de mediana resolución, satélites de alta resolución espacial, satélites meteorológicos geoestacionarios, satélites meteorológicos de órbita polar, Terra-Aqua, misiones Radar, sensores hiperespectrales (Chuvienco, 2016).

II.II.I. Landsat

El programa Landsat son un conjunto de satélites de observación de la tierra (Figura 3), están en órbita desde el año 1972 proveyendo información valiosa para la investigación de uso de suelo o cambio de suelo, es un esfuerzo conjunto entre la USGS y la NASA, entre los satélites que llevan el nombre de Landsat, el número 5 es el que tiene un récord Guinness como el satélite de mayor edad funcionando. Landsat 7

y 8 son los satélites que actualmente proveen imágenes satelitales, realizan una órbita cada 99 minutos y cubren toda la tierra en 16 días, ambos satélites añaden 1000 imágenes por día al servidor (U.S. Geological Survey, 2015).

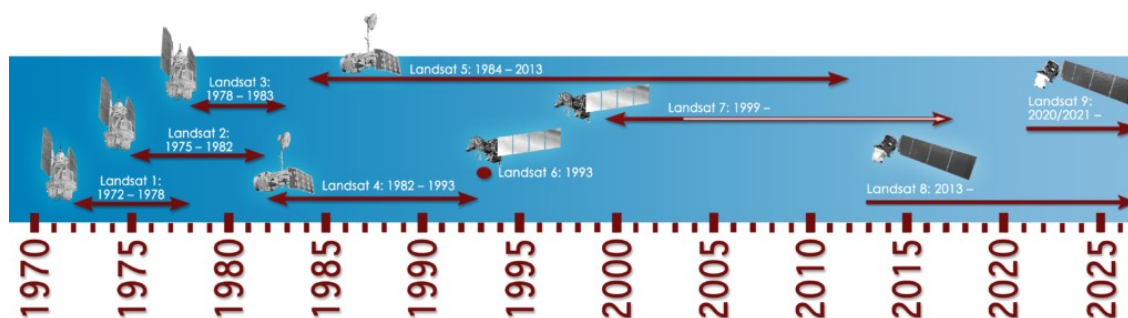


Figura 3: Línea de tiempo de los satélites Landsat (NASA, 2018)

El satélite Landsat 8 contiene dos sensores a diferencia de Landsat 7 que lleva 1 (Figura 4), el primero es el sensor Imágenes de Operacionales de la Tierra (OLI) y el segundo es el Sensor Infrarrojo Termal (TIRS). El sensor OLI colecta información de imágenes de 9 bandas espectrales de onda corta cubriendo 190 km por imagen, tiene una resolución espacial de 30 metros y 15 metros en la banda pancromática; el sensor TIRS es sensible a dos bandas de longitud de onda infrarroja termal, permitiendo la separación de temperatura de la tierra con la de la atmósfera (U.S. Geological Survey, 2016).

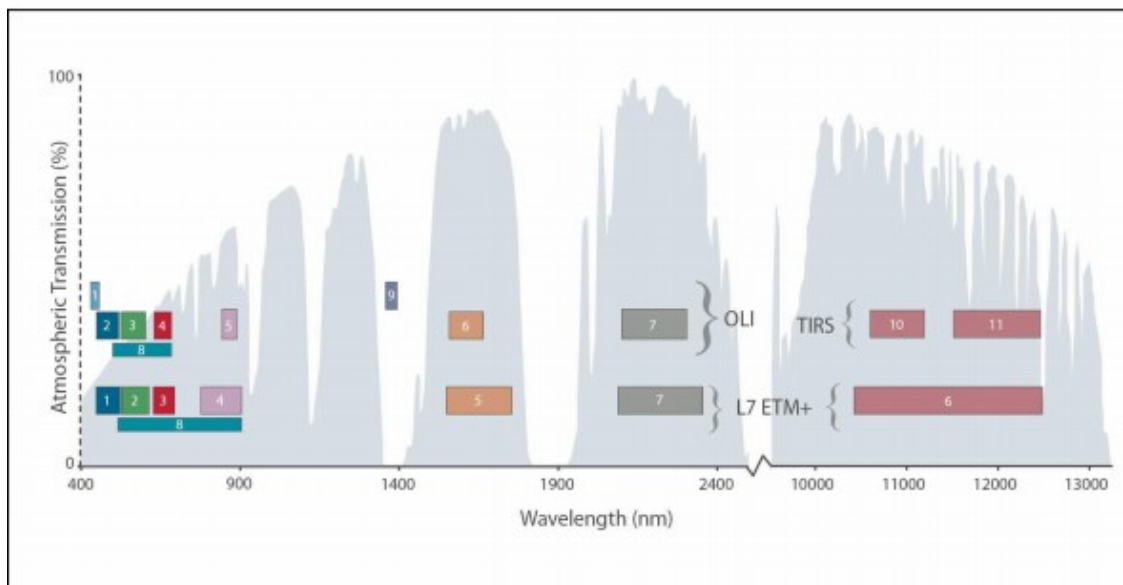


Figura 4: Comparación entre las bandas de Landsat 7 y 8 (U.S. Geological Survey, 2016)

Debido a que las imágenes obtenidas del sensor OLI y TIRS están en Niveles Digitales (DN), se obtienen en imágenes de valores enteros de 16 bits en los productos finales de nivel 1, por lo que pueden convertirse a radiancia espectral usando el siguiente factor de escalamiento introducidos en el archivo de metadatos demostrado en la Ecuación II.1:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (\text{Ecuación II.1})$$

Dónde:

L_{λ} es la radiancia espectral en TOA en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

M_L es el factor de escalamiento multiplicativo de la radiancia, es extraído del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_#), dónde # es el número de banda

A_L es el factor aditivo de escalamiento de la radiancia, es extraído del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_#)

Q_{cal} es el valor de píxel L1 en número digital

Las imágenes en números digitales correspondientes a Landsat 8 pueden ser convertidas directamente a reflectancia en TOA siguiendo la Ecuación II.2 (U.S. Geological Survey, 2016):

$$\rho\lambda = \frac{M_p Q_{cal} + A_p}{\cos\theta_{sz}} \quad (\text{Ecuación II.2})$$

Dónde:

$\rho\lambda$ es la reflectancia espectral planetaria en TOA

M_p es el factor de escalamiento multiplicativo de la reflectancia, es extraído del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x), dónde # es el número de banda

A_p es el factor aditivo de escalamiento de la radiancia, es extraído del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x_#)

θ_{sz} es el ángulo local del cenit solar, es expresado como el complemento de la elevación solar en radianes.

Q_{cal} es el valor de píxel L1 en número digital

La información de TIRS puede ser también convertida a radiación espectral a temperatura de brillo (BT), la cuál es la temperatura efectiva visualizada por el satélite asumiendo la emisividad como unidad, siguiendo Ecuación II.3 (Kosa, 2011):

$$T_b = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (\text{Ecuación II.3})$$

Dónde:

T_b es la temperatura de brillo TOA, o también llamado la temperatura de cuerpo negro en el satélite en K

L_λ es la radiación espectral en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

$K1$ y $K2$ son constantes de conversión termal para la banda, obtenido del archivo metadato

L_λ es la radiancia espectral en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$, obtenida de la Ecuación II.1

II.II.II. Sentinel

Los satélites Sentinel están desarrollados por la ESA (Agencia Espacial Europea) en correspondencia de la unión entre la ESA y la iniciativa de la Comisión Europea llamada GMES, busca actualizar satélites antiguos para que haya una continuidad de información, cada misión se basa en diferentes aspectos, siendo estos Observación de la tierra, Atmósfera, Océanos y Monitoreo de la Tierra. Encontrándose las misiones Sentinel 1, Sentinel 2, Sentinel 3, Sentinel 4 y Sentinel 5 (ESA, 2018a). De igual forma que Landsat, los productos de Sentinel 2 pueden obtenerse en diferentes niveles de procesamiento y este tipo de imágenes pueden ser procesadas usando los toolbox de la ESA implementados en el programa SNAP (ESA, 2015).

II.II.III. ALOS World 3D

La Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA) ha procedido desde del 2014 el proyecto para desarrollar un mapa preciso global digital en 3D “ALOS World 3D” ó AW3D, cubriendo las áreas de tierra globales a través del uso de 3 millones de escenas archivadas adquiridas por el sensor de mapeo estéreo pancromático PRISM en ALOS ó también llamado “DAICHI” que fue operado desde el 2006 al 2011. El desarrollo de del mapa digital en 3D consiste de DEM ó DSM que pueden representar terrenos con aproximadamente 5 metros de

resolución espacial y 5 metros de precisión en altura. JAXA ha liberado gratuitamente “ALOS World 3D-30m” ó AW3D30, que es un DSM con resolución espacial de 30 metros (1 arco segundo en latitud y longitud) convertido a partir de AW3D DSM de 5 metros de resolución, siendo este a su vez el primero en el mundo y el más preciso mapa que cure todas las escalas de la tierra con 5 metros de grilla (EORC & JAXA, 2018).

II.III. Correcciones Atmosféricas

La radiación de la superficie de la tierra sufre una significativa interacción con la atmósfera antes de llegar al sensor del satélite, esta interacción es más fuerte cuando la superficie no cuenta con objetos brillantes tales como cuerpos de agua o vegetación, por lo que es necesario considerar los efectos de la atmósfera y aplicar correcciones atmosféricas durante el preprocesamiento de la información digital. Muchos métodos de corrección atmosférica han sido propuestos, tales como métodos basados en las imágenes, métodos que usen Modelización atmosférico y finalmente métodos que usen información de la tierra (Sola et al., 2018). La precisión cualitativa y cuantitativa recuperada por las imágenes satelitales requiere remover los efectos de la dispersión y absorción en la atmósfera, la reflexión de la superficie del mar y las radiancias en el tope de la atmósfera (Martin et al., 2012).

Entre los métodos más comunes se encuentra el método DOS y sus variedades, y entre los más complejos o que requieren más procesamiento o información son los métodos COST, 6S (Martin et al., 2012) y SEN2COR (ESA, 2018b). A continuación, se describe el método DOS.

El método DOS (Sustracción de Objeto Oscuro) es un modelo basado en la imagen que ha sido propuesto para simplificar las correcciones atmosféricas. Se basa en que los objetos oscuros existen dentro de una imagen y tiene cero reflectancia; consecuentemente la radiancia resultante de píxeles correspondientes es proporcional a la radiancia del camino atmosférico, y puede ser usado para contabilizar los efectos añadidos por la dispersión atmosférica. Los valores mínimos de los píxeles son seleccionados para cada banda individualmente con un método de histograma y sustraídos de todos los valores de los píxeles para la correspondiente banda a través de la imagen (Martin et al., 2012). Existen variedad de métodos DOS (DOS1, DOS2, DOS3, DOS4 y sus variaciones), todos están basados en diferentes asunciones de la transmisividad atmosférica en la dirección de visión (T_v), en la transmisividad atmosférica en la dirección de iluminación (T_z), y la irradiancia difusa que va hacia la tierra (E_{down}), siendo el método DOS1 el más sencillo (Moran, Jackson, Slater, & Teillet, 1992) y presentado en la Ecuación II.4:

$$\rho_{\lambda} = \frac{(L_{\lambda} - L_p) \cdot d^2 \cdot \pi}{T_v (E S U N_{\lambda} \cdot \cos \theta_i \cdot T_z) + E_{down}} \quad (\text{Ecuación II.4})$$

Dónde:

ρ_{λ} es la reflectancia atmosférica superficial

L_{λ} corresponde a la radiancia espectral medida por el sensor del satélite en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

L_p corresponde a la radiancia espectral atmosférica dispersada hacia la dirección del sensor, o también conocido como la radiación de camino en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$

d^2 es el cuadrado de la distancia entre la superficie y el satélite, d en Unidades Astronómicas.

T_v es es la transmitancia atmosférica en la dirección de visión

T_z es la transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación

E_{down} es la irradiancia difusa que va en dirección hacia la tierra

θ_s es el ángulo cenital solar en grados, el cual es el complemento de la elevación solar

Según Sobrino, Jiménez-Muñoz, y Paolini (2004), L_p es definido en la Ecuación II.5:

$$L_p = L_{min} - L_{DO1} \quad (\text{Ecuación II.5})$$

Dónde:

L_{min} es la radiancia que corresponde a un conteo de valores digitales para lo cual la suma de todos los píxeles con valores digitales menores o iguales a este valor es igual al 0.01% de la suma de todos los píxeles de la imagen considerada

$L_{DO1\%}$ es la radiancia del objeto oscuro, asumido de tener una reflectancia equivalente a 0.01

Por consiguiente, para las imágenes de Landsat el cálculo se desarrolla según la Ecuación II.6:

$$L_{min} = M_L DN_{min} + A_L \quad (\text{Ecuación II.6})$$

Dónde:

M_L es el factor multiplicativo de re-escalamiento para Landsat proveniente del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

A_L es el factor aditivo de re-escalamiento para Landsat proveniente del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)

Q_{cal} es un producto de valores de píxeles estándar cuantificado y calibrado (DN)

La radiancia del Objeto Oscuro se describe en la Ecuación II.7 (Sobriño et al., 2004):

$$L_{DO1\%} = 0.01 \cdot [ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot T_z + E_{down}] \cdot T_v / (\pi \cdot d^2) \text{cuación II.7}$$

Dónde T_v , T_z y E_{down} , varían según el tipo de técnica DOS a usar como se muestra en la Figura 5 (Song, Woodcock, Seto, Lenney, & Macomber, 2001):

<i>Methods</i>	T_v	T_z	E_{down}
DOS1	1.0	1.0	0.0
DOS2	1.0	$\cos(\theta_z)$	0.0
DOS3	$e^{-\tau/\cos(\theta_v)}$	$e^{-\tau/\cos(\theta_z)}$	Rayleigh(6S)
DOS4	$e^{-\tau/\cos(\theta_v)}$	$e^{-\tau/\cos(\theta_z)}$	πL_p

Figura 5: Parámetros para los 4 alcances de DOS (Song et al., 2001).

Dónde:

t_r es el grosor óptico para la dispersión de Rayleigh (t_r)

t es la transmisividad atmosférica

θ_v es el ángulo de dirección de visión.

θ_z es el ángulo cenital solar

II.IV. Precipitación Efectiva

Se define a la precipitación efectiva como la precipitación en un área de cultivo que durante un tiempo específico está disponible para cubrir los requerimientos de transpiración potencial en un área de cultivos. Entre los factores que afectan la precipitación están la cantidad y su frecuencia, el

tiempo de ocurrencia, la intensidad, análisis de temporadas secas y húmedas, cultivos irrigados, tasa de infiltración, capacidad retención del agua en los suelos, movimiento agua-suelo, pendiente de campo, condiciones superficiales del terreno, profundidad al agua subterránea, método de riego, frecuencia de aplicación de agua y efecto escala (Bos, 2009). La FAO divide los métodos para el cálculo de la precipitación efectiva en métodos empíricos y métodos determinados por fórmulas (Dastane, 1978), pero debido a que los métodos empíricos requieren de demasiada información no se aplican comúnmente en las irrigaciones, optando por los métodos por fórmulas

Entre los métodos más populares se tiene la ecuación de Renfro, el método del departamento de reclamación de los Estados Unidos, el método de Ratio de evapotranspiración potencial/precipitación, el método de cambios de humedad del suelo, el método de balance diario de humedad de suelo, métodos empíricos en función del país, métodos en función de cultivo de arroz u otro (Dastane, 1978) y el método de número de curva (Bos, 2009). A continuación, se describe el método USDA-SCS:

Este método semi empírico fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 1970, este método se combina con una estimación mejorada del efecto de la profundidad de aplicación de riego neto sobre la precipitación efectiva; este método fue realizado con 22 estaciones y 50 años de información considerando variedad de factores, los cuales son principalmente la precipitación mensual promedio acumulada, la evapotranspiración mensual acumulada y la profundidad de aplicación de irrigación.

La ecuación II.8 representa el método USDA-SCS, cabe resaltar que las unidades presentes en esta ecuación se presentan en pulgadas (United States. Soil Conservation Service, 1993).

$$P_e = SF \cdot (0.70917 \cdot P_t^{0.82416} - 0.11556) \cdot (10^{0.02426 \cdot ET_c}) \text{ecuación II.8}$$

Dónde:

P_e es la precipitación mensual efectiva (pulg)

P_t es la precipitación promedio mensual (pulg)

ET_c es la evapotranspiración del cultivo promedio mensual (pulg)

SF es el Factor de almacenamiento de agua en suelo

El factor de almacenamiento de agua en suelo se determina mediante la ecuación II.9

$$SF = (0.531747 + 0.295164 \cdot D - 0.057697 \cdot D^2 + 0.003804 \cdot D^3) \text{ecuación II.9}$$

Dónde:

D es el almacenamiento de agua disponible (pulg), este término se calcula normalmente como el 40 al 60 por ciento de la capacidad de agua disponible en el suelo, esto es influenciado también por las prácticas de irrigación.

Estas ecuaciones no incluyen dos factores importantes los cuales son la tasa de infiltración del suelo y la intensidad de la lluvia debido a que la información no estaba disponible cuando se realizaron, la pendiente reduce la infiltración por lo que también se tomaría como un factor en contra; es aplicable generalmente en áreas con baja intensidad de lluvia y suelos que tienen alta tasa de infiltración (United States. Soil Conservation Service, 1993).

II.V. Evapotranspiración

Evaporación es un proceso en el cual la materia cambia su fase de líquido o sólido a la fase gaseosa, el cambio de fase sólida a gaseosa es usualmente llamado sublimación; toda la materia puede evaporarse si es que sus moléculas tienen la suficiente energía para la fase de transición. La evaporación de agua de las plantas, la cual es transportada a través de las plantas desde el suelo a las hojas es de particular importancia y es referida como transpiración, es una parte del proceso de producción de las plantas; la evaporación de agua acumulada directamente en la superficie de las plantas puede ser definida como evaporación de agua interceptada, simultáneamente la evaporación del suelo, agua, y plantas es conocida como Evapotranspiración como se demuestra en la Figura 6 (Novák, 2012).

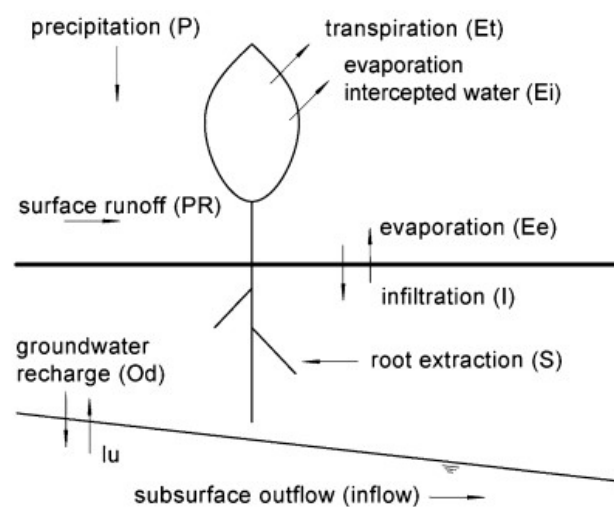


Figura 6: Procesos de transporte de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Novák, 2012).

El proceso de evaporación se compara según Monteith como una transacción en la cual una superficie húmeda está “vendiendo” agua a su ambiente en forma gaseosa, cualquier gramo de agua a 20°C es pagado con 2450 J de

energía, la “transacción” puede ser desarrollada de diferentes formas: por energía de radiación solar, por convección de aire caliente desde lugares de altas temperaturas, el “precio” de agua evaporada es alto, para incrementar la temperatura de 1g de agua en 1°C se necesitan 4.18 J de energía, por lo que elevar de 0 a 100°C se requieren 418 J de energía, el cual es 5.86 veces menos que el calor necesario para evaporar un gramo de agua (2257 J), esto demuestra la importancia de la evaporación no solo en el ciclo del agua, si no, en el ciclo de energía también (Novák, 2012), en la Tabla 1 se demuestran los balances de agua en la tierra.

Tabla 1: Valores promedios anuales de los componentes de la ecuación de balance de agua de la Tierra.

Continent	Area, 10 ³ km ²	Volume of water per year, km ³ year ⁻¹		
		Precipitation (P)	Runoff (O)	Evapotranspiration (E)
Europe	10,500	8,290	3,210	5,080
Asia	43,475	32,240	14,410	17,830
Africa	30,120	22,350	4,570	17,780
North America	24,200	18,300	8,200	10,100
South America	17,800	28,400	11,760	16,640
Australia	7,615	34,170	300	3,170

Continent	Water layer, mm/year			Ratio	
	P	O	E	E/P	O/P
Europe	789	305	489	0.62	0.38
Asia	742	332	410	0.55	0.45
Africa	742	151	591	0.8	0.2
North America	755	339	417	0.55	0.45
South America	1,600	650	940	0.59	0.41
Australia	455	40	415	0.91	0.09

Fuente: Novák, (2012).

Según Dingman (2015), desde el punto de vista hidrológico, la demanda evaporativa climática que es principalmente una función de la radiación solar, humedad y el viento es llamado Evapotranspiración Potencial (PET); entonces la Evapotranspiración actual (ET) en tierra puede ser limitante de energía donde la PET es menor que la precipitación (regiones húmedas) o

limitante de agua donde la PET excede la precipitación ;los procesos de evapotranspiración son clasificados para superficies específicas y situaciones de intercambio de energía determinados por: el tipo de superficie, la disponibilidad de agua, el uso de energía almacenada y el uso de energía advectiva del agua.

II.V.I. Evapotranspiración de referencia de cultivo y Potencial

Según Dingman (2015), el concepto de PET es originario de la clasificación climática propuesta por Thornthwaite (1948), el cuál intento que el concepto dependa del tiempo y el clima, este concepto es problemático porque hay variedad de características vegetativas que influyen en la tasa de evapotranspiración, entre ellos está el albedo que se relaciona con la radiación neta, la conductancia máxima de hojas, la conductancia atmosférica, que es largamente determinada por altura de la vegetación y la presencia o ausencia de agua interceptada; por lo que Penman (1956) sugirió reemplazar la PET con el concepto de Evapotranspiración de referencia (ET_o) de cultivo, el cual está definido como la cantidad de agua transpirada por un cultivo verde corto, completamente sombreando el suelo y de una altura uniforme, y que nunca tiene escasez de agua. Otra preocupación de este concepto es que su magnitud es usualmente calculada de información meteorológica colectada bajo condiciones en las cuales la tasa de ET es menos que la tasa potencial; a pesar de todo el concepto de PET se ha demostrado útil como un índice del “poder secador” del clima o de las condiciones meteorológica del ambiente. Los métodos pueden estar clasificados por estar basados en la temperatura, radiación, métodos combinados, medición directa, bandejas y atmosféricos. En regiones áridas y calientes la PET excede la precipitación, así que la ET promedio es limitante de agua y es cercanamente igual al promedio de la precipitación. En regiones

con abundante precipitación en todas las estaciones, la evapotranspiración es limitada por la disponibilidad de energía, así que la evapotranspiración promedio es esencialmente igual a la PET promedio, se detallan varios enfoques propuestos por el autor; para evapotranspiración potencial se encuentran los métodos de balance de agua mensual, funciones de humedad del suelo, el enfoque complementario (advección-aridez), enfoque de balance de agua, el enfoque de intercambio turbulento y balances de energía y el método basado en la calidad de agua

(Abteu & Melesse, 2013), añaden una clasificación diferente para los métodos, esta clasificación está dividida en métodos simples que involucra el método de bandejas o “Pan”, basados en temperatura, basados en radiación, basados en radiación solar y máxima temperatura y los de transferencia de masa; además añade los métodos complejos en los cuales presenta el método de balance de energía y el método de Penman; por último, añade los métodos que acoplan la teledetección; la mayoría se ha mencionado previamente pero se procederá a desarrollar completamente los métodos complejos

Método Penman

El método de evapotranspiración según Penman es el preferido para calcular la evapotranspiración, fue desarrollado por Howard Penman en 1948 para describir la evapotranspiración de cuerpos libres de agua, es completa porque describe el proceso de evaporación considerando el componente de humedad disponible, transferencia de masa y requiere energía, temperatura diaria promedio, velocidad de viento, humedad relativa, radiación solar, e incorpora conceptos de otras ecuaciones como la de Dalton que refiere al flujo de en masa de humedad siendo este función de la velocidad de viento, déficit de presión de vapor y resistencia superficial . La resistencia ofrecida

por las moléculas de agua al dejar la superficie de agua y moverse hacia la atmósfera está en función de la densidad del aire, calor específico del aire, constante psicrométrica, calor latente de vaporización, resistencia superficial y velocidad de viento; la energía necesaria para la evaporación está en función de la evaporación y la radiación solar neta que está dividida entre calor sensible y calor latente, y se asume que no hay ganancia o pérdida de calor con el suelo, se hicieron algunos intentos para formular la evaporación basado en componentes aerodinámicos como lo hizo Dalton en los cuales se involucraba la transferencia de masa, posteriormente se combinó esto con balances de energías en lo cual Penman desarrolló una ecuación. Por último, la ecuación de Penman-Monteith (Ecuación II.10) es cercana al modelo físico de estimación de la evapotranspiración y es aplicable a pequeños lapsos de tiempo como los días, se toma en cuenta el balance de energía, la transferencia de momento y la transferencia de masa, siendo así aceptada como un estándar para la ETo.

$$ET = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_s - e_a) \frac{1}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (\text{Ecuación II.10})$$

Dónde:

ET es la evaporación en mm/día

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en kPa/°C

γ es la constante psicrométrica en kPa/°C

R_n es la radiación neta en MJ/m²día

G es el flujo de calor en MJ/m²día

ρ es la densidad atmosférica en kg/m³

c_p es el calor específico de la humedad del aire en kJ/kg°C

$(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor

r_s es la resistencia de la cobertura foliar

r_a es la resistencia aerodinámica

λ es el calor latente de vaporización en MJ/kg

Pereira, Allen, Raes, y Smith, (1998), recomiendan la adopción de la Ecuación II.11 simplificada de Evapotranspiración tomando como cultivo de referencia al pasto:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Ecuación II.11})$$

El desarrollo de la ecuación de Penman-Monteith viene descrito por el paper de drenaje e irrigación de la FAO N°56 y viene dado por la serie de ecuaciones y criterios (Pereira et al., 1998):

Según Monteith, las pérdidas por vapor de agua de una hoja por difusión son equivalente a un circuito eléctrico con resistencias cuticulares siendo análogas a la resistencia del flujo de corriente, presentando que la resistencia del follaje es inversa a la conductividad del follaje, la resistencia del follaje está representada por la Ecuación II.12:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (\text{Ecuación II.12})$$

Dónde:

r_s es la resistencia promedio diaria de la masa del follaje superficial en s/m

r_l es la resistencia de los estomas de una hoja bien iluminada en s/m, se aproxima a 100 s/m bajo condiciones de buen riego

LAI_{active} es el índice de área foliar

La resistencia aerodinámica ha sido presentada comúnmente como una función de las características de la superficie y de la velocidad del viento, presentando la Ecuación II.13 está restringida a condiciones neutrales de estabilidad:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z}$$

(Ecuación II.13)

Dónde:

r_a es la resistencia aerodinámica en s/m

z_m es la medida de la altura del viento en m

z_h es la medida de la altura de la humedad

d es la altura de desplazamiento del plano cero en m

z_{om} es la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momento en m

z_{oh} es la transferencia de momento gobernada por la longitud de la rugosidad en m

k es la constante de von Karman's, el cual toma un valor de 0.41

u_z es la velocidad del viento a la altura z en m/s

Las variables para la r_a pueden ser estimadas en base a la altura del cultivo según las Ecuaciones II.14, II.15 y II.16:

$$d = \frac{2h}{3} \quad \text{(Ecuación II.14)}$$

$$z_{om} = 0.123h \quad \text{(Ecuación II.15)}$$

$$z_{oh} = 0.1z_{om} \quad \text{(Ecuación II.16)}$$

Dónde:

d es la altura de desplazamiento del plano cero en m

z_{om} es la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momento en m

z_{oh} es la transferencia de momento gobernada por la longitud de la rugosidad en m

h es la altura del cultivo

El índice de área foliar es calculado mediante las Ecuaciones II.17 y II.18:

$$LAI_{active} = 0.5LAI \quad (\text{Ecuación II.17})$$

$$LAI = 24h \quad (\text{Ecuación II.18})$$

Dónde:

LAI_{active} es el índice de área foliar que contribuye activamente calor a la superficie y transferencia de vapor

LAI es el índice de área foliar

h es la altura del cultivo en m

Se añaden los parámetros generales implementados por el método referentes a cultivos de alfalfa y pasto cuando hay la ausencia de datos, para lo cual se tomaría una altura promedio de cultivo equivalente a 0.12 m , una resistencia superficial de 70 s/m , y un albedo de 0.23 .

El calor latente de vaporización λ es la energía recibida por unidad de área, esta variable está en función de la temperatura, por ejemplo, agua a 20°C esta variable tiene un valor de 2.45 MJ/kg , lo que significa que 2.45 MJ son necesarios para vaporizar 1 kg ó 0.001 m^3 , en 1 m^2 puede vaporizar 0.001 m o 1 mm de agua; como λ varía ligeramente en los rangos de temperatura se utiliza el valor para 2.45 MJ/kg por defecto.

La constante psicrométrica se puede definir en función de la altura, ya que los parámetros utilizados para su cálculo se pueden considerar constantes para cualquier locación como se describe en la ecuación II.19:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (\text{Ecuación II.19})$$

Dónde:

γ es la constante psicrométrica en kPa/°C

P es la presión atmosférica en kPa

ε es la proporción del peso molecular de vapor de agua y aire seco, el estándar es 0.622

λ es el calor latente de vaporización, el estándar es 2.45 MJ/kg

c_p es el calor específico a presión constante, el estándar es 1.013E^{-3} MJ/kg°C

P se define como la presión ejercida por el peso de la masa atmosférica sobre la superficie terrestre, una baja P en altitudes promueve la evaporación, se puede calcular con una simplificación de la ley de gases ideales asumiendo 20°C de temperatura, como se define en la ecuación II.20:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (\text{Ecuación II.20})$$

Dónde:

z se define como la elevación sobre el nivel del mar en metros.

La presión de vapor saturada promedio (e_s) definida en la Ecuación II.21 está relacionada con la temperatura del aire, esta a su vez debe ser calculada como el promedio entre la presión de vapor saturado a la temperatura máxima y mínima del aire diario, semanal, o mensual; esto es debido a que la ecuación para el cálculo no es lineal.

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (\text{Ecuación II.21})$$

Teniendo como base la Ecuación II.22:

$$e^0(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (\text{Ecuación II.22})$$

Dónde:

$e^0(T)$ es la presión de vapor saturada a la temperatura del aire T en kPa

T es la temperatura del aire en °C

La Pendiente de la curva de presión de vapor de agua saturado (Δ), siendo esta una pendiente que relaciona la presión de vapor de agua saturado y la temperatura, y está dado por la Ecuación II.23:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (\text{Ecuación II.23})$$

Dónde:

Δ es la pendiente de la curva de vapor de saturación a la temperatura del aire T en kPa/°C

T es la temperatura del aire en °C, se toma el promedio aritmético de la temperatura máxima y mínima

La presión de vapor actual (e_a) puede ser calculada a partir de la temperatura de punto de rocío, de la humedad relativa y de información psicrométrica determinada a partir de la Ecuación II.24:

$$e_a = e^0(T_{wet}) - \gamma_{psy}(T_{dry} - T_{wet}) \quad (\text{Ecuación II.24})$$

Dónde:

$e^0(T_{wet})$ es la presión de vapor saturado a la temperatura del bulbo húmedo en kPa

γ_{psy} es la constante psicrométrica del instrumento en kPa/°C

$T_{dry} - T_{wet}$ es la depresión del bulbo húmedo en °C

La constante psicrométrica del instrumento está dada por la Ecuación II.25:

$$\gamma_{psy} = a_{psy}P \quad (\text{Ecuación II.25})$$

Dónde a_{psy} es un coeficiente dependiendo del tipo de ventilación del bulbo húmedo, y P es la presión atmosférica en kPa. El coeficiente a_{psy} depende del diseño del psicrómetro y la tasa de ventilación:

0.000662 para psicrómetros ventilados, con ventilación de aire de 5m/s

0.000800 para psicrómetros ventilados naturalmente, alrededor de 1m/s

0.001200 para psicrómetros no ventilados, dentro de habitaciones.

La radiación extraterrestre (R_a) definida en la Ecuación II.26 es la radiación perpendicular a los rayos del sol que golpea la superficie del tope de la atmósfera, está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos del sol y la superficie normal de la atmósfera, este varía durante el día y será diferente para variedades de latitudes, si el sol está directamente encima el valor de ángulo de incidencia equivale a 0.0820 MJ/m²min, se calcula en base a latitudes, constante solar, declinación solar y el tiempo del año:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (\text{Ecuación II.26})$$

Dónde:

R_a es la radiación extraterrestre en MJ/m²día

G_{sc} es la constante solar, equivale a 0.0820 MJ/m²min

d_r es la distancia relativa Tierra-Sol inversa

ω_s es el ángulo de la hora de la puesta del sol en rad

φ es la latitud en rad

δ es la declinación solar en rad.

Además, d_r y δ están dados por las Ecuaciones II.27 y II.28:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (\text{Ecuación II.27})$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (\text{Ecuación II.28})$$

Dónde:

J es el número de días en el año entre el primero de enero y la fecha de los datos a simular, puede ser determinado para cada día, cada diez días o mensualmente, para datos mensuales se toma el día medio mediante la Ecuación II.29:

$$J = \text{INTEGER}(30.4M - 15) \quad (\text{Ecuación II.29})$$

Dónde M es el número del mes de interés.

El ángulo de la puesta de sol está dado por la Ecuación II.30:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (\text{Ecuación II.30})$$

Dónde φ es la latitud de la estación meteorológica en radianes.

La duración relativa de sol (n/N) es otra proporción que expresa la ausencia de nubes en la atmósfera, representada por la duración actual del sol (n) con la máxima posibilidad de duración del sol o horas de luz (N). En ausencia de nubes n equivale a N y la proporción es uno, en días nublados n y el ratio equivalen a cero, es usada para derivar la radiación solar de radiación extraterrestre cuando no hay información de R_s . El cálculo esta dado por la Ecuación II.31:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (\text{Ecuación II.31})$$

La radiación solar o de onda corta (R_s) definida en la Ecuación II.32, es la radiación que llega a la superficie mientras la radiación penetra la atmósfera, algo de radiación es dispersada reflejada o absorbida por los gases atmosféricos, en días sin nubes equivale a un 75% de R_a y en días nublados corresponde a un 25% de R_a ; también es conocido como radiación global implicando que es la suma directa de radiación de onda corta del sol y radiación del cielo difusa. Puede ser calculada mediante la fórmula de Ångstrom, que relaciona radiación solar extraterrestre y duración de horas de sol relativa.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (\text{Ecuación II.32})$$

Dónde:

n es la duración actual de sol en MJ/m² día

N es la duración posible máxima de sol o horas de luz en horas

n/N es la duración relativa de sol

R_a es la radiación extraterrestre en MJ/m² día

a_s es una constante de regresión que expresa la fracción de radiación extraterrestre que alcanza la tierra en días nublados ($n=0$)

$a_s + b_s$ es la fracción de radiación extraterrestre que alcanza la tierra en días claros ($n=N$), siendo recomendable el uso de a_s equivalente a 0.25 y b_s equivalente a 0.5

Radiación de onda corta relativa (R_s/R_{so}) es la proporción entre R_s que es la radiación que llega a la superficie de la tierra en un periodo, y la radiación solar de cielo limpio (R_{so}) que es la radiación que alcanzaría la misma superficie durante el mismo tiempo que R_s sin nubosidad. Es una forma de expresar la nubosidad de la atmósfera y presenta rangos entre 0.33 que significa cubierta densa de nubes y 1 que significa cielo limpio.

La radiación solar de cielo despejado se calcula para cuando no hay datos de “ a_s ” o “ b_s ” definida como la Ecuación II.33:

$$R_{so} = (0.75 + 2E^{-5}z) R_a \quad (\text{Ecuación II.33})$$

Dónde:

z es la elevación sobre el nivel del mar en metros

La radiación de onda corta neta o radiación solar neta (R_{ns}), se define en función del albedo y R_s .

Albedo (α), refiere a la fracción considerable de radiación solar que llega a la superficie y es reflejada, esta fracción es altamente variable para diferentes superficies y para el ángulo de incidencia o pendiente de la superficie de la tierra, varía de 0.95 para nieve fresca y 0.05 para suelo húmedo desnudo, la vegetación tiene un albedo entre 0.20 y 0.25. La radiación neta de onda corta es definida por la Ecuación II.34:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (\text{Ecuación II.34})$$

Dónde:

R_{ns} es la radiación neta de onda corta en MJ/m² día

α es el albedo o el coeficiente de reflexión de cobertura vegetal, este valor se toma como 0.23 siendo este el valor de referencia para cultivos de hierbas.

La radiación de onda larga neta (R_{nl}) es la diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente con respecto a la superficie de la tierra, la parte saliente es la parte de energía que pierde la tierra por varios procesos incluyendo la radiación, esto se origina después que la tierra absorba la radiación emitida por el sol y la convierta en energía calorífica; la radiación de onda larga entrante corresponde a la fracción de la radiación de onda larga saliente que es absorbida por la atmósfera y que aumenta su temperatura produciendo que la atmósfera irradie energía por su cuenta; por último, otra fracción de radiación saliente se pierde en el espacio. El cálculo está dado por la proporción de la temperatura absoluta de la superficie, expresada por la ley de Stefan-Boltzmann, la cual menciona que el flujo de energía dejando la superficie terrestre es menor que el dado por la ley de Stefan-Boltzmann debido a la absorción y la radiación hacia abajo del cielo; el vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono y polvo absorben y emiten radiación de onda larga, como la humedad y la nubosidad juegan un rol importante sirven para corregir la estimación del flujo neto de salida de la radiación de onda corta, esta es definida mediante la Ecuación II.35:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

(Ecuación II.35)

Dónde:

R_{nl} es la radiación neta de onda larga saliente en MJ/m² día

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, se toma el valor de $4.903E^{-9}$ MJ/
 $K^4m^2día$

$T_{max,K}$ es la temperatura máxima absoluta durante el periodo de 24 horas,
dónde $K= °C ++273.16$

$T_{min,K}$ es la temperatura mínima absoluta durante el periodo de 24 horas,
dónde $K= °C ++273.16$

e_a es la presión de vapor actual en kPa

R_s/R_{so} es la radiación de onda corta relativa

R_s es la radiación solar en MJ/m²día

R_{so} es la radiación de cielo despejado en MJ/m²día

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación saliente y entrante de longitudes de onda corta y larga. Es un balance entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie de la tierra, o la diferencia entre energía entrante de onda corta (R_{ns}) y energía saliente de onda larga (R_{nl}), normalmente es positiva durante el día y negativa durante la noche. R_n viene definido por la Ecuación II.36:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Ecuación II.36})$$

El flujo de calor del suelo (G) es la energía que es usada en el calentamiento del suelo, es positivo cuando el suelo es calentado y negativo cuando se está enfriando; tiene un valor pequeño comparado con R_n y puede ser ignorado, teóricamente debe ser añadido al valor de R_n , para periodos mensuales en los cuales la capacidad calorífica del suelo es 2.1 y para el agua 4.18 MJ/m³ °C y una profundidad de suelo apropiada se define como la Ecuación II.37:

$$G_{month,i} = 0.07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \quad (\text{Ecuación II.37})$$

Ó si es que no se tiene información de temperatura en $i+1$, se puede calcular mediante la Ecuación II.38:

$$G_{month,i} = 0.14(T_{month,i} - T_{month,i-1}) \text{ (Ecuación II.38)}$$

Dónde:

G es el flujo de calor del suelo en MJ/m² día

T_i es la temperatura a tiempo i en °C

T_{i-1} es la temperatura a tiempo $i-1$

T_{i+1} es la temperatura a tiempo $i+1$

Cada valor de radiación calculado en esta fórmula puede ser expresado en función de profundidades de agua o viceversa, mediante la Ecuación II.39:

$$\text{Radiación}(\text{profundidad}) = \frac{\text{Radiación}(\text{energía/superficie})}{\lambda \rho_w} \text{ ecuación II.39}$$

Dónde:

λ es el calor latente de vaporización, 2.45 MJ/kg por defecto

ρ_w es la densidad del agua, 1000 kg/m³ por defecto

Radiación(profundidad) es la radiación en metros/tiempo

Radiación(energía/superficie) es la radiación en MJ/m² tiempo

La densidad atmosférica está dada por Ecuación II.40:

$$\rho = \frac{P}{T_{kv} * R} \text{ (Ecuación II.40)}$$

Dónde:

ρ es la densidad atmosférica en kg/m^3

P es la presión atmosférica en kPa

R es la constante específica de gases, equivale a 0.287 J/kgK

T_{Kv} es la temperatura virtual en K

Por lo que la temperatura virtual está dada por la Ecuación II.41:

$$T_{Kv} = 1.01(T + 273) \quad (\text{Ecuación II.41})$$

Dónde:

T_K es la temperatura absoluta en K

T es la temperatura media del aire en $^{\circ}\text{C}$

El cálculo de la evapotranspiración en escalas de tiempo horarios se calcula siguiendo Ecuación II.42:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0(T_{hr} - e_a))}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación II.42}$$

Dónde se añaden o cambian:

T_{hr} es la temperatura horaria en $^{\circ}\text{C}$

$e^0(T_{hr})$ es la presión de saturación de vapor horaria en kPa

Adicionalmente en el cálculo de la evapotranspiración horaria, se añade el cambio del valor de la constante de Stefan-Boltzman a $2.043\text{E-}10 \text{ MJ/m}^2/\text{hora}$, la proporción R_s/R_{s0} se representa como 0.8 para climas áridos o semi áridos, en el cálculo de la radiación neta de onda larga se toma un único valor de Temperatura en vez de un promedio de máximos y mínimos.

La radiación extraterrestre (R_a) para periodos horarios o menores se calcula mediante la Ecuación II.43:

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2 - \omega_1))] \quad \text{(Ecuación II.43)}$$

Dónde:

G_{sc} es la constante solar equivalente a 0.0820 MJ/m²/min

ω_1 y ω_2 son el ángulo de tiempo solar al inicio y final del periodo respectivamente en radianes, están definidos por las Ecuaciones II.44 y II.45:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi * t_1}{24} \quad \text{(Ecuación II.44)}$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi * t_1}{24} \quad \text{(Ecuación II.45)}$$

Dónde:

t_1 es la longitud del periodo de cálculo en horas, 1 para periodos horarios o 0.5 para 30 minutos

ω es el ángulo de tiempo solar al punto medio de periodos horarios o más pequeños (radianes), está definido por la Ecuación II.46:

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + Sc - 12)] \quad \text{Ecuación II.46}$$

Dónde:

t es el tiempo estándar de reloj al punto medio del periodo en horas

L_z es la longitud del centro del tiempo local en grados oeste con respecto al meridiano de Greenwich

L_m es la longitud del lugar con respecto al este del meridiano de Greenwich
 S_c es la corrección estacional para el tiempo solar en horas, y es calculado mediante las Ecuaciones II.47 y II.48:

$$S_c = 0.1645\sin(2b) - 0.1255\cos(b) - 0.025\sin(b) \text{ (Ecuación II.47)}$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \text{ (Ecuación II.48)}$$

Dónde J es el número de días, y se establece la condición de que $\omega > -\omega_s$ ó $\omega > \omega_s$ corresponde a que el sol está bajo el horizonte y R_a se toma como 0

Modelización de Flujos de Energía Superficiales Distribuidos Espacialmente

Los modelos para el cálculo de la evapotranspiración mediante teledetección de mayor uso son Algoritmo de Balance de Energía Superficial para Tierra (SEBAL), Balance de Energía de Dos Fuentes (TSEB), Sistema de Balance de Energía Superficial (SEBS), Mapeo de Evapotranspiración a Resolución Alta usando Calibración Internalizada (METRIC), Balance de Energía Superficial Simplificado (SEBS) e Índice de Balance de Energía Superficial Simplificado (S-SEBI); los satélites más comunes para el cálculo de esto son Landsat, ASTER, y MODIS (Abteu & Melesse, 2013). El diagrama de flujo de SEBAL según Faris et al. (2016) se visualiza en la Figura 7.

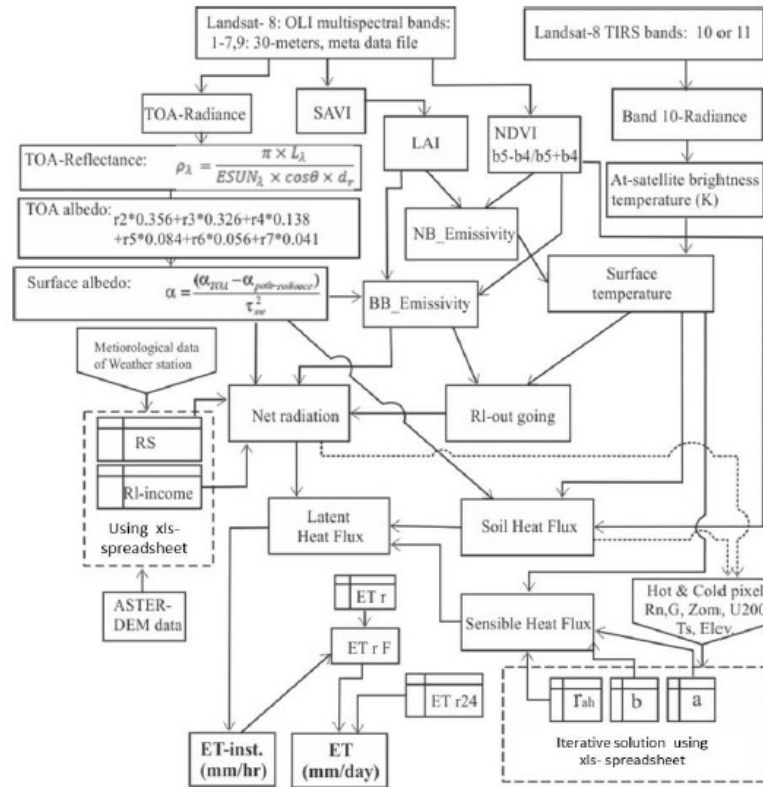


Figura 7: Diagrama de Flujo del cálculo de la Radiación Superficial Neta (Faris et al., 2016).

En el modelo SEBAL, la ET es calculada de imágenes satelitales e información climática usando balances de energía como se visualiza en la Figura 8, como los satélites proveen información solo del tiempo de pasada, se calcula un flujo de ET instantáneo, este flujo se calcula para cada píxel como energía residual del balance de la Ecuación II.49:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (\text{Ecuación II.49})$$

Dónde:

λET es el flujo de calor latente en W/m^2

R_n es el flujo de radiación neta en la superficie en W/m^2

G es el flujo de calor del suelo en W/m^2

H es el flujo de calor sensible al aire en W/m^2

Energy Balance for ET

ET is calculated as a “residual” of the energy balance

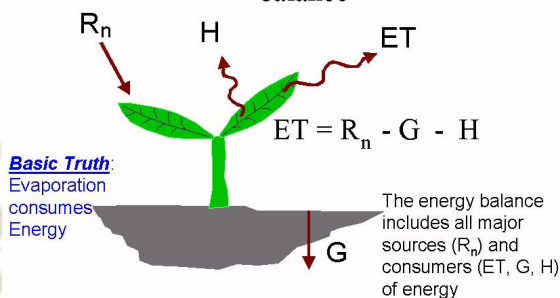


Figura 8: Balance de energía en SEBAL (Allen et al., 2011)

El primer procedimiento para SEBAL es calcular R_n usando la Ecuación II.50 de balance de energía (Allen et al., 2011):

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (\text{Ecuación II.50})$$

Dónde:

R_n es la radiación neta en W/m^2

α es el albedo superficial (sin unidades)

$R_{S\downarrow}$ es la radiación de onda corta entrante en W/m^2

$R_{L\downarrow}$ es la radiación de onda larga entrante en W/m^2

$R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga saliente en W/m^2

ε_o es la emisividad superficial (sin unidades)

Antes de proceder se debe resolver la Ecuación II.1 para el cálculo de la radiancia, las ecuaciones 1 y 2 para el cálculo de la reflectancia en el sensor

OLI, y las ecuaciones 3 y 4 para el cálculo del brillo en TOA del sensor TIRS.

El albedo definido como la proporción de la radiación reflejada con la radiación incidente de onda larga, primeramente, el albedo en TOA (α_{TOA}), que es un albedo sin ajustes de la transmisividad atmosférica es calculado (Tasumi, Allen, & Trezza, 2008), definido mediante la Ecuación II.51:

$$\alpha_{TOA} = \sum (\omega_{\lambda} \rho_{\lambda}) \quad \text{(Ecuación II.51)}$$

Dónde:

ρ_{λ} es la reflectividad de las bandas 2 al 7

ω_{λ} es el coeficiente de peso para cada banda, calculado según la Ecuación II.52:

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad \text{(Ecuación II.52)}$$

El coeficiente de peso para las bandas 2 a 7 en Landsat 8 están dadas por los valores presentes en la Tabla 2.

Tabla 2: Irradiancia Solar Espectral Exoatmosférica (ESUN) de Landsat-8 OLI para las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9

Banda	ESUN
2	2067
3	1893
4	1603
5	972.6
6	245
7	79.72
9	399.7

Fuente: Bernardo B. da Silva et al., (2016).

Se calcula el albedo superficial mediante la Ecuación II.53, el cual se calcula corrigiendo el albedo TOA de la transmisividad atmosférica (Tasumi et al., 2008):

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_{path\ radiance}}{t_{sw}^2} \quad (\text{Ecuación II.53})$$

Dónde:

$\alpha_{path\ radiance}$ es la porción promedio de la radiación solar a través de todas las bandas que es dispersada devuelta al satélite antes de que llegue a la superficie de la tierra, es recomendable un valor de 0.03.

t_{sw} es la transmisividad atmosférica de onda corta, calculada asumiendo condiciones de cielo limpio y condiciones secas y funciones en relación con la elevación (Pereira et al., 1998), desarrollada mediante la Ecuación II.54:

$$t_{sw} = 0.75 + 2E^{-5}Z \quad (\text{Ecuación II.54})$$

Dónde:

z es la elevación sobre el nivel del mar (DEM).

En condiciones de altos niveles de aerosoles o polvo en la atmósfera, el usuario deseará predecir el albedo separadamente para cada banda usando un modelo de transferencia de radiación atmosférica o también llamado de corrección atmosférica.

La Radiación de Onda corta Entrante (R_{s1}) es el flujo de radiación solar directa y difusa que alcanza la superficie terrestre (W/m^2), calculada asumiendo condiciones de cielo limpio como constante del tiempo de toma de la imagen en base a (Waters, Allen, Bastiaanssen, Tasumi, & Trezza, 2002), siguiendo la Ecuación II.55:

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \cdot \cos\theta \cdot d_r \cdot t_{sw} \quad (\text{Ecuación II.55})$$

Dónde:

G_{sc} es la constante solar equivalente a 1367 W/m^2

θ es el ángulo de incidencia solar, donde $\theta = 90 - \text{ángulo de elevación solar}$

d_r es la distancia relativa inversa cuadrada de la tierra-sol, este valor se obtiene en el metadato de las imágenes.

t_{sw} es la transmisividad atmosférica

La radiación de Onda Larga Saliente ($R_{L\uparrow}$) es la radiación emitida por la superficie a la atmósfera, para su cálculo se necesitan 3 índices comunes de vegetación calculados en base a la reflectancia: Índice de Vegetación Diferenciado Normalizado (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado de Suelo (SAVI), e Índice de Área Foliar (LAI).

El NDVI es el ratio de las diferencias entre reflectividades de la banda infrarroja cercana (NIR) y la banda roja (R), es un indicador de la cantidad y condición de la vegetación, los valores varían entre -1 a +1, superficies verdes van desde 0 a 1 y el agua o nubes es menor que cero (Waters et al., 2002), este es definido en la Ecuación II.56:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{Ecuación II.56})$$

El índice SAVI intenta abstraer los efectos del fondo del suelo del NDVI, así que los índices de humedad de suelo son reducidos, es calculado como (Waters et al., 2002), este es definido en la Ecuación II.57:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - R)}{L + NIR + R} \quad (\text{Ecuación II.57})$$

Dónde:

L es una constante, se usa frecuentemente el valor de 0.5, esto puede ser calibrado con comparaciones de imágenes con suelo húmedo y seco.

El índice LAI es la proporción del área total de todas las hojas de una planta con área de suelo representada por la planta, es un indicador de biomasa y resistencia de cubierta foliar, el máximo valor es 6 que se relaciona con un valor máximo de SAVI de 0.687 puede ser calculado mediante la Ecuación II.58:

$$LAI = -\frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (\text{Ecuación II.58})$$

La Emisividad Superficial es la proporción de la energía radiada termal sobre una superficie con la energía radiada termal por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se necesitan 2 emisividades superficiales para SEBAL, la primera corresponde a un comportamiento superficial para la emisión termal en la banda de longitud de onda 10.4 a 12.5 μm expresada como ε_{NB} , la segunda es la emisividad que representa el comportamiento superficial para una emisión termal en el espectro amplio de 6 a 14 μm expresada como ε_0 (Waters et al., 2002), definido mediante la Ecuación II.59

$$\varepsilon_{...} = \begin{cases} \varepsilon_{NB} = 0.97 + 0.033LAI & \text{for } LAI < 3 \\ \varepsilon_0 = 0.95 + 0.01LAI & \text{for } LAI < 3 \\ \varepsilon_{NB} = 0.98 & \text{for } LAI \geq 3 \\ \varepsilon_0 = 0.98 & \text{for } LAI \geq 3 \\ \varepsilon_{NB} = 0.99 & \text{for } water; NDVI < 0, \alpha < 0.47 \\ \varepsilon_0 = 0.985 & \text{for } water; NDVI < 0, \alpha < 0.47 \end{cases}$$

(Ecuación II.59)

La temperatura superficial corregida (T_s) o también llamada temperatura superficial de la tierra (LST), se calcula mediante la ecuación propuesta por Weng, Lu, y Schubring, (2004), definida en la Ecuación II.60:

$$T_s = \frac{T_b}{1 + (\lambda T_b / \gamma) \ln \varepsilon} \quad (\text{Ecuación II.60})$$

Dónde:

T_b es la temperatura de brillo de la banda 10 de Landsat 8.

λ es el promedio de los límites de longitud de onda de la banda 10 de Landsat 8 (10.895 μm)

ε es la emisividad termal correspondiente de longitud de banda menor (ε_{NB})

La variable gamma (γ) es calculada mediante la Ecuación II.61:

$$\gamma = h \cdot c / a \quad (\text{Ecuación II.61})$$

Dónde:

h es la constante de Plank (6.626×10^{-34} J.s)

c es la velocidad de la luz (2.998×10^8 m/s)

a es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} j.k)

Los coeficientes a usar para el cálculo de la temperatura superficial son presentados en la Tabla 3.

Tabla 3: Constantes utilizadas para Landsat 8

Landsat-8 TIRS		Banda 10	Banda 11
Constantes termales	K_1	1321.08	1201.14
	K_2	777.89	480.89
Factor de Re-escalamiento	M_L	0	0
	A_L	0.1	0.1
Valores de emisividad	ε_s	0.971	0.977
	ε_v	0.987	0.989

Fuente: Madugundu, Al-Gaadi, Tola, Hassaballa, & Patil, (2017).

La radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$) es calculada usando la ecuación de Stefan-Boltzmann (Waters et al., 2002), según la Ecuación II.62:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{Ecuación II.62})$$

Dónde:

ε_0 es la emisividad superficial obtenida de la Ecuación II.59

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, que equivale a $5.67E^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

T_s es la temperatura superficial en K

Se debe escoger los píxeles “ancla” calientes y fríos, el píxel frío es seleccionado como una zona bien irrigada, húmeda cubierta de vegetación, el píxel caliente es seleccionado como seco, suelo desnudo agrícola donde la ET es asumida como cero, se tienen las siguientes consideraciones (Waters et al., 2002):

- ✓ Píxel Frío

Se relaciona con áreas de cultivo bien irrigadas y con abundante cobertura foliar.

1. Crear una imagen RGB (bandas azul, verde y rojo) con las bandas o una imagen de falso color
2. Adicionar la banda de temperatura superficial y visualizar los rangos de temperatura.
3. Enfocarse en las zonas agrícolas que tengan un color verde intenso.
4. Se debe enfocar las áreas con un albedo entre 0.22 y 0.44; y un LAI entre 4 y 6
5. Una vez identificada un área con esas condiciones visualizar otras áreas que tengan estas características
6. Escoger la temperatura superficial del píxel frío (T_{Scold}), tener cuidado que no sea una temperatura extrema y también prever los ruidos en la imagen o efectos atmosféricos.

Para este píxel se cumple que la evapotranspiración es 5% mayor que la normal, por lo que el balance de energía viene definido por la Ecuación II.63:

$$H_{cold} = Rn_{cold} - G_{cold} - 1.05ETr \quad (\text{Ecuación II.63})$$

✓ Píxel Caliente

Se relaciona con áreas de suelo seco y desnudo, que no haya tenido irrigación o precipitación en los últimos 3-4 días, de lo contrario se tendría que realizar un balance de humedad de suelo.

1. Se siguen los pasos 1 y 2 del procedimiento del píxel frío

2. Enfocarse en las zonas secas de suelo desnudo, pero que sean campos agrícolas, que no incluya zonas desérticas, asfalto, techos, o pendientes de montañas debido a que proporcionan extremas temperaturas.
3. Se debe enfocar las áreas con un LAI entre 0 y 0.4, en zonas montañosas debe ser un área con una pendiente menor a 1%

Para este píxel se cumple que no hay evapotranspiración ($ET = 0$), por lo que se tiene el balance definido en la Ecuación II.64:

$$H_{hot} = Rn_{hot} - G_{hot} \quad (\text{Ecuación II.64})$$

La Radiación de onda larga Entrante ($R_{L\downarrow}$) es el flujo de radiación termal de la atmósfera, se calcula usando la ecuación de Stefan-Boltzmann (Waters et al., 2002), definida en la Ecuación II.65:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (\text{Ecuación II.65})$$

Dónde:

ε_a es la emisividad atmosférica

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, que equivale a $5.67E^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

T_a es la temperatura del aire cercana a la superficie en K, este valor se reemplaza por el valor del píxel frío

Para ε_a se puede resolver (Waters et al., 2002), mediante la Ecuación II.66:

$$\varepsilon_a = 0.85 * (-\ln t_{sw})^{0.09} \quad (\text{Ecuación II.66})$$

El flujo de calor del Suelo (G) es la tasa de almacenamiento de calor en el suelo y vegetación debido a conducción, SEBAL primero calcula la

proporción G/R_n usando la ecuación empírica representado valores cercanos a mediodía (Bastiaanssen, 2000), definida en la Ecuación II.67:

$$G/R_n = \begin{cases} \frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) & \text{if } NDVI < 0 = \text{agua} \\ G/R_n = 0.5 & \\ G/R_n = 0.5 & \text{if } T_s < 4C = \text{nieve} \end{cases}$$

(Ecuación II.67)

Dónde:

T_s es la temperatura superficial en °C

α es el albedo superficial

El flujo de calor sensible (H) es la tasa de pérdida de calor al aire por convección y conducción debido a gradientes de temperatura, es calculado siguiendo la siguiente ecuación de transporte de calor (Waters et al., 2002), definido en la Ecuación II.68:

$$H = \frac{\rho \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad \text{(Ecuación II.68)}$$

Dónde:

ρ es la densidad del aire en kg/m^3

c_p es el calor específico del aire, tiene el valor de 1004 J/kg/K

dT es la diferencia de temperatura en K, de las dos alturas z_1 y z_2

r_{ah} es la resistencia atmosférica al transporte de vapor en m/s

Para obtener la estabilidad del valor r_{ah} son usados los píxeles ancla frío y caliente a dos alturas z_1 y z_2 , los cuales facilitan el cálculo de las diferencias

de temperatura cercana superficial. Esta diferencia es calculada a partir de la siguiente ecuación (Waters et al., 2002), definido en la Ecuación II.69:

$$dT = aT_s + b \quad (\text{Ecuación II.69})$$

Dónde:

a y b son coeficientes de correlación calculados mediante iteraciones.

Continuando, para el cálculo de r_{ah} se debe primero calcular la velocidad de viento a 200 metros en la estación meteorológica, posteriormente se calcula la velocidad de fricción en cada píxel y por último se tienen valores de r_{ah} para cada píxel definido en la Ecuación II.70:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* \cdot k} \quad (\text{Ecuación II.70})$$

Dónde:

z_1 y z_2 son las alturas sobre el plano de desplazamiento cero de la vegetación en metros, usualmente se usan valores de 0.1 y 2 metros respectivamente

k es la constante de von Karman, equivale a 0.41

u^* es la velocidad de fricción en m/s

La velocidad de fricción a 200 metros en la estación meteorológica necesita primero el cálculo de la velocidad de fricción y es calculada para condiciones atmosféricas neutrales, esta consideración supone que la estación meteorológica está rodeada por vegetación bien irrigada, definido en la Ecuación II.71:

$$u^* = \frac{k u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \quad (\text{Ecuación II.71})$$

Dónde:

k es la constante de von karman:

z_x es la velocidad del viento a la altura z_x , la altura x equivale a la altura en la que no se encuentren efectos por la rugosidad superficial, es llamada altura de mezcla y es usado el valor de 200 metros.

z_{om} es la longitud de rugosidad de momento definido en la Ecuación II.72:

$$z_{om} = 0.123h \quad (\text{Ecuación II.72})$$

Dónde:

h es la altura de la vegetación en metros, se toma un valor por defecto de 0.15 metros, que corresponde al cultivo de pasto

Entonces u_x o u_{200} , se define mediante la Ecuación II.73:

$$u_x = u_{200} = u^* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)}{k} \quad (\text{Ecuación II.73})$$

Dónde:

u^* se define con el cálculo de la Ecuación II.71 para la altura de la velocidad de viento equivalente a la estación meteorológica, equivale a 2 m.

Una vez obtenido esto, se calcula el mapa de velocidad de fricción a 200 metros, el cual toma la ecuación 77, y reemplaza el valor de longitud de rugosidad (Z_{om}), por un mapa de (Z_{om}) definido en la Ecuación II.74:

$$Z_{om} = 0.018LAI \quad (\text{Ecuación II.74})$$

Las condiciones de estabilidad de la atmósfera son definidas usando la longitud de Monin-Obukhov (L), definido en la Ecuación II.75:

$$L = -\frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (\text{Ecuación II.75})$$

Dónde:

ρ , c_p , u^* , T_s y H han sido definidos previamente

g es la constante de gravedad, equivale a 9.81 m/s^2

Los valores de condiciones de estabilidad de la atmósfera, cuando $L < 0$ la atmósfera es considerada inestable, cuando $L > 0$ la atmósfera es considerada estable y si $L = 0$ la atmósfera es considerada neutral; dependiendo de estos valores se derivan los valores de corrección de estabilidad para momento (ψ_m) y calor (ψ_h), siguiendo las ecuaciones adoptadas por Paulson (1970) y Webb (1970), definidas en las Ecuaciones II.76, II.77, II.78, y II.79:

$$\Psi_m \Psi_h = \begin{cases} \text{if } L < 0 & \Psi_{m(200m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{200m}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x_{200m}^2}{2} \right) - 2 \text{ARCTAN}(x_{(200m)} + 0.5\pi \\ & \Psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{2m}^2}{2} \right) \\ & \Psi_{h(0.1m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{0.1m}^2}{2} \right) \\ \text{if } L > 0 & \Psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \\ & \Psi_{h(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \\ & \Psi_{h(0.1m)} = -5 \left(\frac{0.1}{L} \right) \\ \text{if } L = 0 & \Psi_m = 0 \\ & \Psi_h = 0 \end{cases}$$

(Ecuación II.76)

Dónde:

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L} \right)^{0.25} \quad (\text{Ecuación II.77})$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0.25} \quad (\text{Ecuación II.78})$$

$$x_{(0.1m)} = \left(1 - 16 \frac{0.1}{L}\right)^{0.25} \quad (\text{Ecuación II.79})$$

Con los valores de ψ_m y ψ_h , se puede calcular un valor corregido para la velocidad de fricción (u^*) mediante la Ecuación II.80:

$$u^* = \frac{u_{200}k}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right) - \psi_m(200m)} \quad (\text{Ecuación II.80})$$

Por último, un valor corregido de la resistencia aerodinámica al transporte de calor es calculado en cada iteración mediante la Ecuación II.81:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_h(z_2) + \psi_h(z_1)}{u^* \cdot k} \quad (\text{Ecuación II.81})$$

El procedimiento de la iteración consiste en:

1. Calcular un nuevo valor de dT usando el valor corregido de r_{ah} .
2. Calcular una aproximación de la temperatura de aire para cada píxel (T_a) y la densidad de aire
3. Se calcula de nuevo un valor de H corregido
4. Se calcula nuevos valores corregidos de estabilidad
5. Se repite este proceso hasta que dT_{hot} y r_{ah} para el píxel caliente están estabilizados.
6. Se calcula un valor final corregido de H en cada píxel que servirá para el cálculo de la ET instantánea.

Se procede a resolver la ecuación 45 para el cálculo de λET , a lo cual se debe proceder a calcular el valor profundidad de evaporación equivalente (Oberg & Meless, 2006), mediante la Ecuación II.82:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (\text{Ecuación II.82})$$

Dónde:

ET_{inst} es la ET instantánea en mm/hr

3600 es el factor para convertir a horas.

λ es el calor latente de vaporización o calor absorbido por kg de agua evaporada en J/kg, puede ser definido en función de la temperatura media (T_a) (Faris, Al-Sulttani, Ochtyra, Jarocin'ska, & Marcinkowska, 2016), mediante la Ecuación II.83:

$$\lambda = 2.501 - (T_a - 273) * 0.002361 \quad (\text{Ecuación II.83})$$

La fracción de ET de referencia (ET_rF) es definida como la proporción de ET_{nst} , de cada píxel a la (ET_r) calculada de información climática. Además, esta fracción está muy relacionada con el coeficiente de cultivo, mediante la Ecuación II.84:

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (\text{Ecuación II.84})$$

El cálculo de la evapotranspiración extrapolada a valores diarios requiere de la multiplicación de ET_{rF} y la evapotranspiración calculada mediante Penman-Monteith para valores diarios.

II.VI. Información de los cultivos

La información de los cultivos debe estar considerada en base a valores disponibles, de lo contrario se pueden recopilar valores de los artículos

científicos desarrollados por la FAO. Entre los parámetros necesarios se encuentran los valores por periodo de desarrollo de k_c , duración de etapas, profundidad de raíces, agotamiento crítico, respuesta de campo y altura de cultivos a lo largo de las etapas de desarrollo.

II.VI.I. Evapotranspiración de Cultivo (ET_c) y Coeficiente de cultivo (k_c)

El cálculo de la ET_c bajo condiciones estándar implica que no existan limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrica o salino, densidad del cultivo, plagas o enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. Este es calculado a través del enfoque del coeficiente de cultivo donde los efectos atmosféricos son incorporados en la ET_o (Pereira et al., 1998, p. 56), mediante la Ecuación II.85:

$$ET_c = k_c ET_o \quad (\text{Ecuación II.85})$$

Dónde:

k_c integra las características del cultivo y efectos de la evaporación del suelo, el cual es un valor útil para la planificación normal del riego, manejo, definición de calendarios básicos de riego y estudios de balance hídrico.

El k_c también puede ser definido en base al estrés hídrico, esta situación ocurre en suelos secos donde el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenido por fuerzas capilares y de adsorción en la matriz del suelo, este efecto adicional lleva el nombre de coeficiente de estrés hídrico (k_s) que es multiplicado al k_{cb} .

El estrés salino en cultivos es expresado en función de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación y sus efectos principales son del

tipo osmótico, produciendo en el cultivo mayor esfuerzo para extraer agua, originando un efecto similar que el de estrés hídrico, teniendo así efectos en el rendimiento del desarrollo vegetativo, de esta misma forma se puede ajustar para visualizar el rendimiento vegetativo por estrés hídrico.

Adicionalmente, se pueden realizar ajustes en cultivos que tengan otros tipos de prácticas de manejo, entre ellos se pueden encontrar:

- El uso de mantillo en la superficie, el cual puede constar de material orgánico vegetal o mantillo sintético compuestos de láminas de plástico, donde se ve reducción de la evaporación y del k_c , pero un ligero aumento de la transpiración.
- Cultivos intercalados, en los cuales dos cultivos diferentes se desarrollan juntos en el mismo campo, en los cuales el cultivo de mayor altura es representativo del campo en su totalidad, el cual tendrá valores altos de k_c y ET_c , y el cultivo de menor altura se reducirá los valores de k_c y ET_c debido al efecto cortaviento del cultivo de mayor altura, como resultado el valor de k_c para los cultivos puede ser un ponderado de ambos.

II.VI.II. Agotamiento crítico

La Fracción que puede ser agotada antes del estrés hídrico (p), es la fracción que puede ser agotada antes de que la zona radicular presente estrés hídrico, los valores de la fracción que puede ser agotada (p) están en función del poder evaporante de la atmósfera, estos están presentados por Pereira, Allen, Raes, y Smith, (1998). definida mediante la Ecuación II.86:

$$p = p_{Cuadro22} + 0.04(5 - ET) \quad (\text{Ecuación II.86})$$

Dónde:

$p_{Cuadro 22}$ es la fracción de agotamiento propuesta por Pereira, Allen, Raes, y Smith, (1998) en m

ET es la evapotranspiración en mm/día

II.VII. Información del Suelo

La información con respecto a suelo está basada en las propiedades físicas del mismo, entre ellas se encuentran la Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), la máxima tasa de infiltración, máxima profundidad de raíces y el valor del agotamiento inicial del suelo.

II.VII.I. Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente

El contenido de humedad de suelo indica la cantidad de agua presente en el suelo, es comúnmente expresado como la cantidad de agua (en profundidad de mm de agua) presente en una profundidad de un metro de suelo. Durante lluvia o irrigación, los poros del suelo se llenarán de agua, si estos son llenados se dice que el agua está saturada, luego parte del agua se moverá en hacia abajo, este proceso se llama drenaje o percolación (FAO, 1985).

Después de que la percolación para, los poros más grandes son llenados con agua y aire, mientras que los más pequeños están aún llenos de agua, en este estado se dice que el suelo está a Capacidad de Campo (CC), en esta etapa se dice que los contenidos de aire y suelo son ideales para el crecimiento de cultivos (FAO, 1985). Este término se considera obsoleto

debido a que se considera como un punto en el que el drenaje no ocurre, pero en realidad si está presente, el motivo por el cual se sigue usando es por el uso de modelos computacionales que empezaron a surgir en los 80's, los cuales necesitaban un valor para saber la cantidad de agua disponible, y lo que en realidad limita la extracción de agua es la aireación en las raíces, donde al menos debe haber 10% de volumen de aire en las plantas para que puedan sobrevivir; la medición debe ser en el campo, de lo contrario se estima como el contenido de humedad en el suelo a un potencial matricial de suelo de -33 kPa o 0.33 bar (Kirkham, 2014).

Poco a poco, el agua almacenada en el suelo es tomada por las raíces de las plantas o evaporada de la superficie del suelo hacia la atmósfera, si no hay adiciones extras de agua esto se seca gradualmente. Mientras más se seque el suelo, más se retiene el agua y es más difícil para las raíces de las plantas extraerlo del suelo, en una etapa la extracción de agua no es suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas, por consiguiente, la planta pierde frescura y se marchita, las hojas cambian de color verde a amarillo y finalmente la planta muere, a este punto se le llama Punto de Marchitez Permanente (PMP), aún hay agua pero es muy difícil para las raíces extraerlo (FAO, 1985, p. 19). Esta puede medirse experimentalmente cuando una planta empieza a marchitarse e inmediatamente calcular la humedad del suelo, o también puede relacionarse con el contenido de humedad en el suelo a un potencial matricial de suelo de -1500 kPa o -15 bar (Kirkham, 2014). Las características de CC, PMP y saturación son demostradas en la Figura 9.

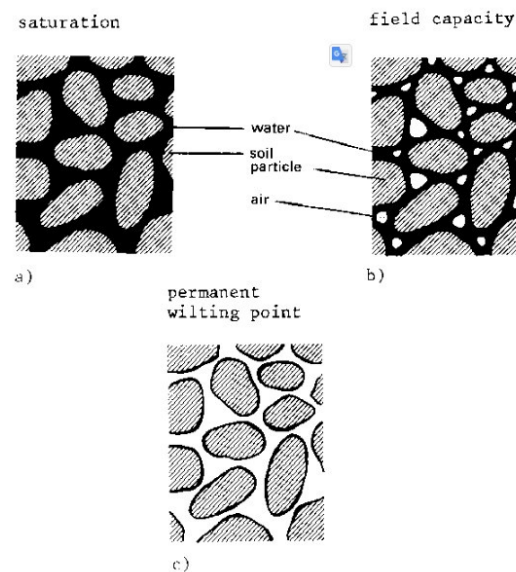


Figura 9: Características de la humedad del suelo: a) Saturación, b) Capacidad de Campo y c) Punto de Marchitez Permanente (FAO, 1985).

Saxton y Rawls (2006) desarrollan ecuaciones de tensión de humedad del suelo con ecuaciones derivadas de una larga base de datos de suelos provenientes de la USDA usando variables comúnmente disponibles de la textura del suelo y materia orgánica; incorpora el mejoramiento de la conductividad y combina estos con los efectos de la densidad, gravas, salinidad y provee un amplio sistema predictivo. Una extensiva base de datos características de agua en el suelo fue obtenida de USDA/NRCS (Base de datos Nacional de Caracterización de Suelos) que consiste aproximadamente de muestras de 2000 horizontes A y 2000 horizontes B-C, este conjunto de datos incluyó el contenido de agua en suelo a una tensión de 33 y 1500 kPa, densidades aparentes, tamaños de partículas equivalentes a arenas, limos y arcillas; y materia orgánica; estos ensayos se desarrollaron con procedimientos estándares de laboratorio y formularon las ecuaciones II.87, II.88, II.89 y II.90:

$$\theta_{1500} = \begin{cases} \theta_{1500t} = \theta_{1500t} + (0.14\theta_{1500t} - 0.02) \\ \theta_{1500t} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM + 0.005(S \cdot OM) - 0.013(C \cdot OM) + 0.068(S \cdot C) + 0.031 \end{cases}$$

(Ecuación II.87)

$$\theta_{33} = \begin{cases} \theta_{33t} = \theta_{33t} + [1.283(\theta_{33t}^2 - 0.374(\theta_{33t}) - 0.015] \\ \theta_{33t} = -0.251S + 0.195C + 0.011OM + 0.006(S \cdot OM) - 0.027(C \cdot OM) + 0.452(S \cdot C) + 0.299 \end{cases}$$

(Ecuación II.88)

$$\theta_{(s-33)} = \begin{cases} \theta_{(s-33)t} = \theta_{(s-33)t} + (0.636\theta_{(s-33)t} - 0.107) \\ \theta_{(s-33)t} = 0.278S + 0.034C + 0.022OM - 0.018(S \cdot OM) - 0.027(C \cdot OM) - 0.584(S \cdot C) + 0.078 \end{cases}$$

(Ecuación II.89)

$$k_b = \begin{cases} k_b = kb/ks \cdot ks \\ kb/ks = \frac{1-R_w}{1-R_w(1-1.5\alpha)} \\ ks = 1930 \cdot (\theta_{(s-33)DF})^{3-\alpha} \\ \lambda = 1/B \\ \theta_{(s-33)DF} = \theta_{s-DF} - \theta_{33-DF} \\ B = [\ln(1500) - \ln(33)] / [\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})] \\ \theta_{s-DF} = 1 - (\rho_{DF}/2.65) \\ \theta_{33-DF} = \theta_{33} - 0.2(\theta_{s-DF} - \theta_s) \\ \rho_{DF} = \rho_N DF \\ \theta_s = \theta_{33} + \theta_{(s-33)} - 0.097S + 0.043 \\ \rho_N = (1 - \theta_s)2.65 \end{cases}$$

(Ecuación II.90)

Dónde:

S son las arenas en %peso

C son las arcillas en %peso

OM es la materia orgánica en %peso

θ_{1500} es la humedad del suelo a 1500 kPa en %v

θ_{1500t} es la primera solución de la humedad del suelo a 1500 kPa en %v

θ_{33} es la densidad normal de la humedad del suelo a 33kPa en %v

θ_{33t} es la primera solución de la densidad normal de la humedad del suelo a 33kPa en %v

θ_s es la densidad normal de la humedad del suelo saturada a 0 kPa en %v

θ_{s-DF} es la densidad ajustada de la humedad del suelo saturada a 0 kPa en %v

θ_{33-DF} es la densidad ajustada de la humedad del suelo a 33 kPa en %v

$\theta_{(s-33)}$ es la densidad normal de la humedad del suelo saturada a 33 kPa en %v

$\theta_{(s-33)t}$ es la primera solución de la densidad normal de la humedad del suelo saturado a 33 kPa en %v

$\theta_{(s-33)DF}$ es la densidad ajustada de la humedad del suelo saturado a 33 kPa en %v

ρ_{DF} es la densidad ajustada en g/cm^3

ρ_N es la densidad normal en g/cm^3

DF es el factor de ajuste de densidad (0.9 – 1.3)

k_b es la conductividad saturada de volumen de suelo en mm/h

k_s es la conductividad saturada del suelo matricial en mm/h

R_w es la fracción de peso de la grava en g/g

α es la matriz de densidad de suelo / densidad de grava $(2.65) = \rho/2.65$

B es un coeficiente de tensión de humedad de suelo

II.VII.II. Agua Disponible Total (ADT) y Agua Fácilmente Aprovechable (AFA)

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la Capacidad de Campo (CC), la cual representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, en otras palabras, la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente. El agua en el suelo es consumido por los cultivos, a mayor consumo el agua remanente será retenida con mayor fuerza por el suelo, reduciendo así su energía potencial y hará más difícil la extracción por las plantas, cuando

el cultivo no puede extraer más agua ha alcanzado el Punto de Marchitez Permanente (PMP), formulando así la ADT (Pereira et al., 1998, p. 56), mediante la Ecuación II.91:

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad (\text{Ecuación II.91})$$

Dónde:

ADT es el agua disponible total en mm

θ_{FC} es el contenido de humedad a capacidad de campo en m^3/m^3

θ_{WP} es el contenido de humedad a punto de marchitez permanente en m^3/m^3

Z_r es la profundidad de las raíces en metros.

A pesar de que en teoría exista agua disponible hasta alcanzar el PMP, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el PMP, esto es debido a que el agua será retenida más fuertemente en la matriz del suelo y será más difícil de extraer, la fracción de ADT que un cultivo puede extraer sin sufrir estrés hídrico se denomina Agua Fácilmente Aprovechable en el suelo (AFA) (Pereira et al., 1998, p. 56), la cual es expresada mediante la Ecuación II.92:

$$AFA = pADT \quad (\text{Ecuación II.92})$$

Dónde:

AFA es el agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular en mm

p es la fracción promedio del ADT que puede ser agotada antes de presentar estrés hídrico

II.VIII. Eficiencia de Riego

No todo el agua que es tomada de una fuente (rio, pozo, entre otros) alcanza la zona de las raíces de las plantas, parte del agua es perdida durante el transporte a través de los canales y campos, la parte sobrante es almacenada en la zona de raíces y eventualmente usada por las raíces, en otras palabras una parte del agua es usada eficientemente, el resto del agua es perdida en los cultivos a irrigar, entre las pérdidas en canales se encuentran (FAO, 1989):

- ✓ Evaporación de la fuente de agua
- ✓ Percolación profunda en las capas del suelo debajo de los canales
- ✓ Filtración a través de los bordes de los canales
- ✓ Rebalsado en los bordes
- ✓ Rompimiento de los bordes
- ✓ Escorrentía en los drenes
- ✓ Hoyos de ratas en los bordes de los canales

Las pérdidas de agua en los campos se dan por:

- ✓ Escorrentía superficial, donde el agua termina en los drenes
- ✓ Percolación profunda en las capas del suelo debajo de la zona de raíces.

La eficiencia de un sistema de riego es la cantidad de agua utilizada por las plantas y la cantidad de agua suministrada desde la bocatoma, la cantidad de agua que es captada desde una fuente natural de un sistema de riego esta conducida a través de un canal principal y luego derivada el agua por un canal de distribución y se deriva el agua a nivel de parcela. La eficiencia de riego (Efr) está compuesta por la eficiencia de la conducción en el canal principal, eficiencia de distribución en los canales laterales y la eficiencia de

aplicación a nivel de parcela (Nuñez & Hurtado, 2015), esto también puede ser afectado por las modalidades de entrega de agua a canales y predios, siendo ejemplos de ello el turnado (mita) (MINAGRI & PSI, 2005), la cual es definida mediante la Ecuación II.3 y en la Figura 10 se demuestra un diagrama de los elementos involucrados en la eficiencia de riego.

$$E_{fr} = E_{fc} \cdot E_{fd} \cdot E_{fa} \quad (\text{Ecuación II.93})$$

Dónde:

E_{fc} es la eficiencia de conducción en %

E_{fd} es la eficiencia de distribución en %

E_{fa} es la eficiencia de aplicación en %

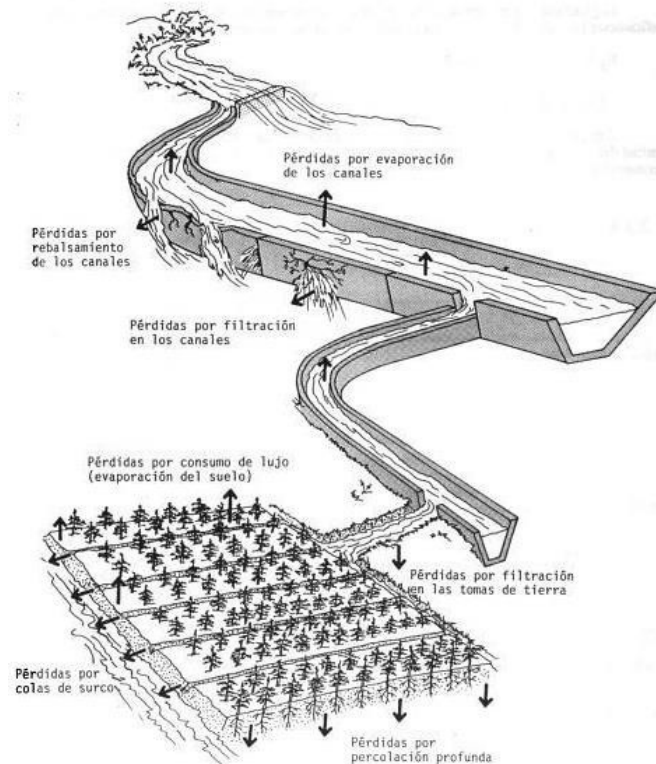


Figura 10: Eficiencia del Sistema de Riego (Nuñez & Hurtado, 2015)

II.VIII.I. Eficiencia de Conducción (Efc)

Permite evaluar la pérdida de agua en el canal principal desde la bocatoma hasta el punto final del canal principal. En caso no es factible tener cerradas las compuertas de los canales laterales de distribución L1, L2, L3,..., Ln se consideran en la forma de cálculo (Nuñez & Hurtado, 2015), esta es definida mediante la Ecuación II.94 y graficada en la Figura 11.

$$Efc = \frac{\text{Caudal que llega al final del canal principal} + \sum \text{caudales de distribución} \cdot 100}{\text{Caudal de agua que entra al sistema}} \quad (\text{Ecuación II.94})$$

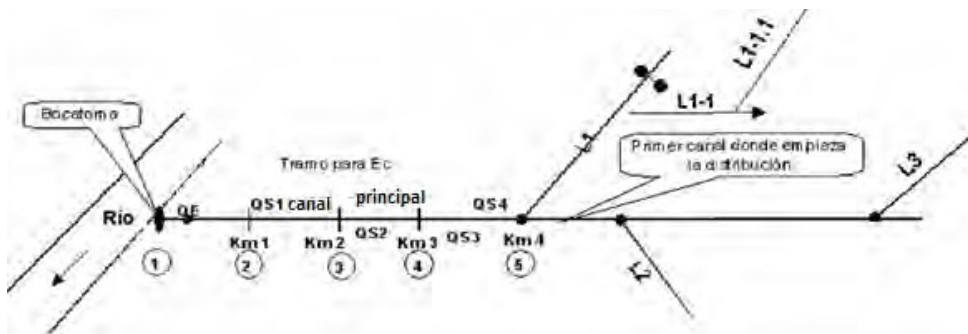


Figura 11: Esquema de la Eficiencia de Conducción (Nuñez & Hurtado, 2015)

II.VIII.II. Eficiencia de Distribución (Efd)

De los canales se obtiene la distribución de 1er, 2do, 3er y etc orden, que sirven para distribuir el agua hacia las parcelas o chacras de los usuarios, la eficiencia de distribución mide la pérdida que se produce entre la toma del lateral del canal principal hasta la entrega de los usuarios en una zona de riego como se visualiza en la Figura 12 (Nuñez & Hurtado, 2015), definido mediante la Ecuación II.95:

$$Efd = \frac{\text{Caudal que llega al final del Canal de Distribución} + \text{Caudales de los laterales} \cdot 100}{\text{Caudal de agua que entra al canal lateral}}$$

(Ecuación II.95)

Por lo tanto al existir en un sistema de riego que contiene varios canales de distribución la eficiencia de ella se determina mediante la Ecuación II.96:

$$Efd = \frac{\text{Sumatoria de eficiencias de Distribución de 1er, 2do, 3er, ... "n" orden}}{\text{Número total de canales de distribución}}$$

(Ecuación II.96)

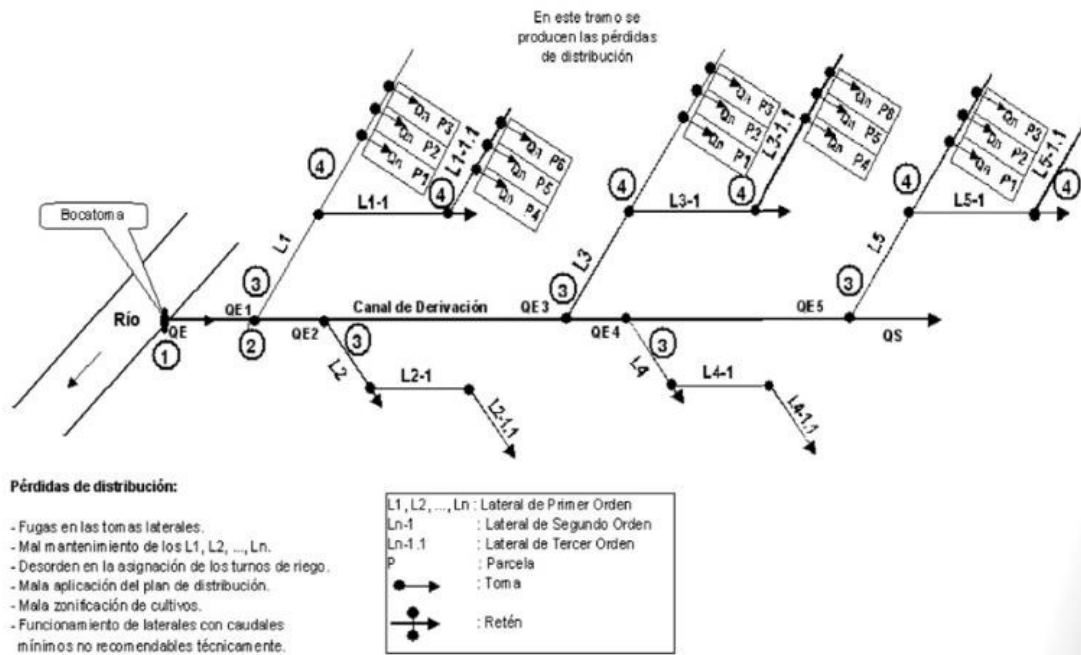


Figura 12: Diagrama de Eficiencia de Distribución (Nuñez & Hurtado, 2015)

II.VIII.III. Eficiencia de Aplicación (Efa)

Es la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación total a la que se aplicó, generalmente se mide en porcentaje o litros de agua útil en el suelo por cada 100 litros aplicados, este valor se verá afectado por la superficie de la parcela, para lo cual se tendrá una relación de proporcionalidad, los valores de eficiencia de aplicación son presentados en la Figura 13.

Método de Riego	Rango de Eficiencia de Aplicación en Porcentaje
SUPERFICIAL	
Riego Tradicional o Tendido	10 – 30
Riego en Curvas de Nivel	30 – 60
Riego por Bordes	40 – 80
Riego por Surcos	40 – 85
PRESURIZADO	
Riego por Aspersión	50 – 90
Riego por Microjet	60 – 95
Riego por Goteo	65 – 95

Figura 13: Eficiencia de Aplicación en % según diferentes Métodos de Riego (Nuñez & Hurtado, 2015)

II.IX. Necesidades de agua en cultivos y Horarios de riego

Las necesidades de agua para un cultivo está en función de la evapotranspiración potencial, la precipitación y los coeficientes de cultivo y está dado por la Ecuación II.97 (FAO, 1997):

$$CWR_i = \sum_{t=0}^T (kc_i ET_{0,i} - P_{eff,i}) \quad (\text{Ecuación II.97})$$

Dónde:

i es un cultivo dado

kc es el coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_0 es la evapotranspiración potencial en mm

P_{eff} es la precipitación efectiva en mm

t es la etapa del cultivo

T es la etapa final del cultivo

Los horarios de riego pueden ser calculados en función de un balance diario de humedad en la zona radicular del suelo, se puede representar la zona radicular como un recipiente en el cual puede fluctuar la cantidad de agua existente, siendo útil expresar el contenido de agua en la forma de agotamiento de agua en la zona radicular, generalmente los parámetros son expresados en forma de lámina de riego. La lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea hacia la zona radicular son procesos que añaden agua a la zona radicular y disminuyen el agotamiento de la humedad en la zona radicular, a este se le añaden las pérdidas por procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación, que son las que

remueven agua de la zona radicular, por lo tanto (Pereira et al., 1998, p. 56), esto definido mediante la Ecuación II.98 y demostrado en la Figura 14.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (\text{Ecuación II.98})$$

Dónde:

$D_{r,i}$ es el agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo al final de día i en mm

$D_{r,i-1}$ es el contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior $i-1$ en mm

P_i es la precipitación en el día i en mm

RO_i es el escurrimiento superficial en el día i en mm

I_i es la lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo en mm

CR_i es el ascenso capilar proveniente de la napa freática en el día i en mm

$ET_{c,i}$ es la evapotranspiración del cultivo en el día i en mm

DP_i son las pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i en mm

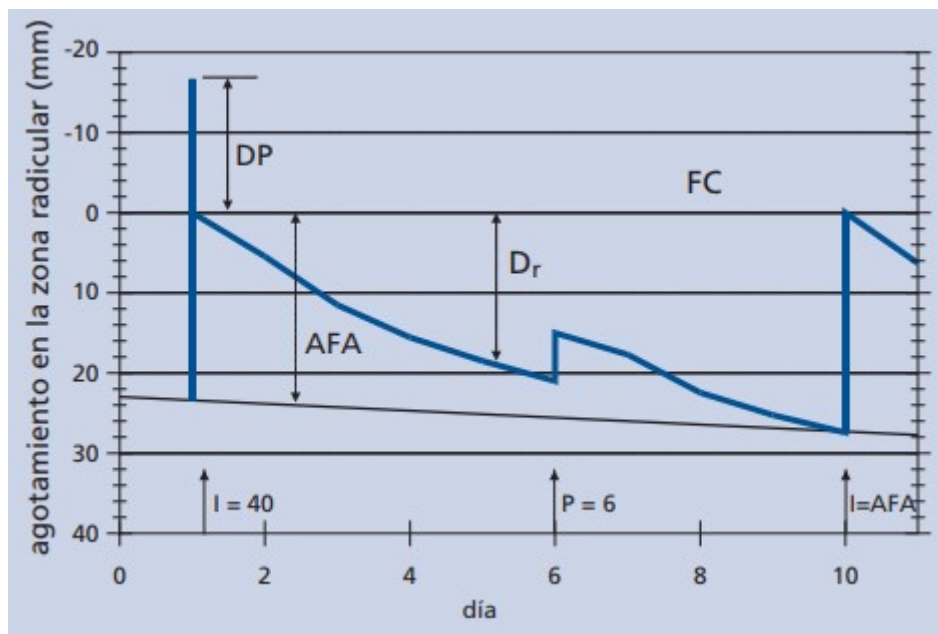


Figura 14: Dinámica del Balance de Agua en Cultivos (Pereira et al., 1998, p. 56)

El agua puede ser almacenada en la zona radicular hasta que se alcance la capacidad de campo, si ocurren lluvias intensas o riego que produzca un exceso en el valor de capacidad de campo, se asume que estos excesos se pierden el mismo día a través de la percolación profunda después de descontar el gasto de ET que ocurra en el día. El ascenso capilar se asume normalmente como cero cuando el nivel de la napa freática se encuentra a más de 1 metro por debajo de la zona radicular.

Los límites de $D_{r,i}$ vienen a ser 0 y ADT, se puede obtener la Ecuación II.99 resumida en base a ello (Andales, Chavez, & Bauder, s. f.):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i - I_i + ET_{c,i} \quad (\text{Ecuación II.99})$$

Dónde:

$D_{r,i}$ esta entre los rangos de 0 y ADT, si llega a valores negativos este se debe reemplazar por cero y estas pérdidas se toman como si fuera la percolación profunda o escorrentía.

El valor mínimo de agotamiento ($D_{r,i-1}$) es igual a cero.; para otras condiciones $D_{r,i-1}$ viene dado por (Pereira et al., 1998, p. 56), esto definido mediante la Ecuación II.100 y el balance en la zona de raíces es ilustrado en la Figura 15.

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1})Z_r \quad (\text{Ecuación II.100})$$

Dónde:

θ_{i-1} es el contenido de humedad promedio en la profundidad efectiva de la zona radicular

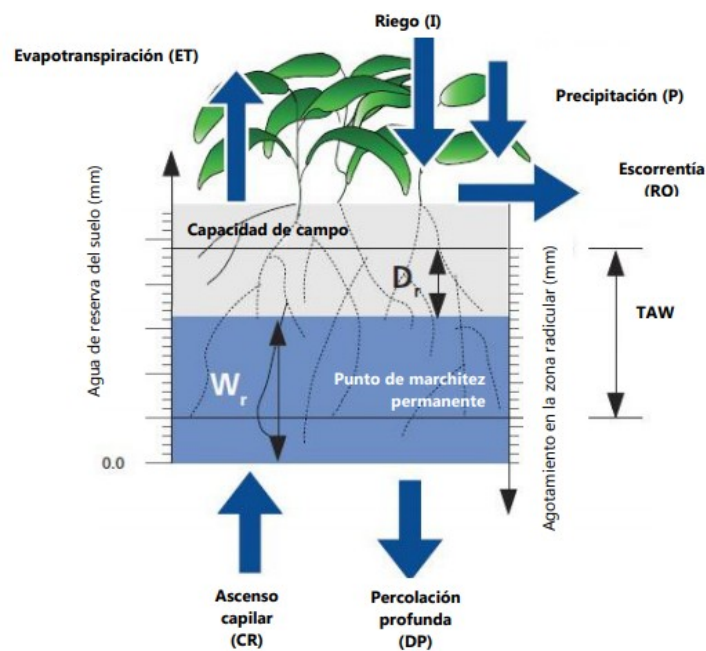


Figura 15: Esquemática del Balance de Humedad del Suelo (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2006)

II.X. Bases de Datos Espaciales

Las Bases de datos o tecnología de bases de datos tienen su mayor impacto en el creciente uso de computadoras, juegan un rol crítico en casi todas las áreas donde las computadoras son usadas, incluyendo negocios, comercios electrónicos, ingeniería, medicina, genética, leyes, educación, y ciencias bibliotecarias. Una base de datos es una colección de información relacionada, por información se entiende que puede ser grabada y tener un significado implícito y tienen las siguientes características (Elmasri & Navathe, 2011):

- ✓ Representa un aspecto del mundo real, a veces llamado un mundo en miniatura, cambios en este mundo en miniatura son reflejados en la base de datos.
- ✓ Es una colección coherente lógica de información con un significado inherente
- ✓ Es diseñada, construida y poblada con información para un propósito específico, tiene un grupo de usuarios de interés

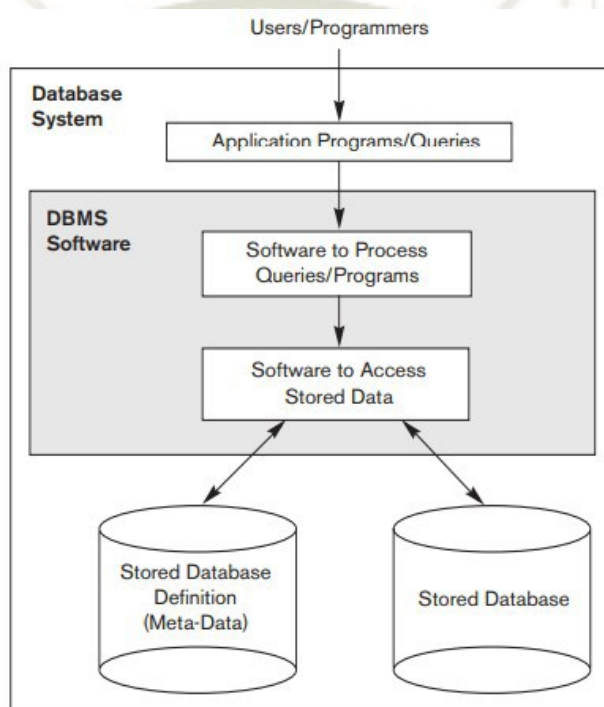


Figura 16: Sistema de Base de Datos Simplificado (Elmasri & Navathe, 2011)

Escoger una base de datos depende si se quiere una estructura relacional (SQL) o (NoSQL), mientras que ambas son opciones viables tienen ciertas diferencias. Bases de datos SQL usan lenguaje de consultas estructurados (SQL), es uno de los más versátiles y mundialmente usados, pero puede ser restrictivo ya que usa esquemas predefinidos para determinar la estructura de la información antes de que trabajes con ella, y toda la información debe

seguir esta estructura, por lo que requiere significativa preparación. Por lo contrario, las bases de datos NoSQL tienen un esquema dinámico para información sin estructura y puede ser almacenada la información de muchas formas: orientada en columnas, documentos, basada en gráficos u organizada como un valor clave (Xplenty, 2017).

Las bases de datos más populares basadas en encuestas realizadas a desarrolladores y usuarios en general desarrollada en el sitio web StackOverflow en el 2018 son las presentadas en la Figura 17:

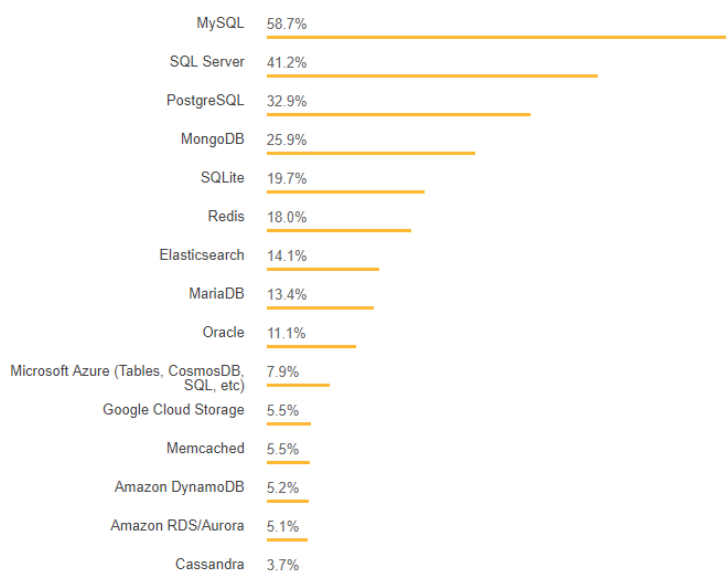


Figura 17: Bases de Datos más Usadas para el 2018 («Stack Overflow Developer Survey 2018», s. f.)

Las Bases de Datos Espaciales proveen un fuerte base para acceder, almacenar y manejar información espacial, estas a diferencia de las Bases de Datos incluyen la posición, tienen geometrías como puntos, líneas y polígonos. Los SIG combinan la información espacial de muchas fuentes con diferentes personas, y las bases de datos conectan los usuarios con la base de datos espacial; además estas pueden incluir variedad de atributos, algunos

ejemplos de bases de datos espaciales se encuentran archivos geodatabases propiedad de ESRI, MySQL, Oracle Spatial, PostGIS, SpatiaLite, Microsoft Access y MongoDB («Spatial Databases - Build Your Spatial Data Empire», 2015)

PostgreSQL es un sistema de base de datos relacional objetivo poderoso y de código abierto, tiene más de 50 años de activo desarrollo que le ha otorgado una fuerte reputación por su confiabilidad, características robustas y desenvolvimiento, y además, pueden tener relaciones uno a uno, uno a varios y varios a varios («PostgreSQL: The world's most advanced open source database», s. f.).

Dentro de PostgreSQL se encuentra la extensión PostGIS, empezó como un proyecto de Investigación de Refracciones y desde entonces ha sido adoptado y mejorado por el gobierno, organizaciones públicas, y compañías privadas, su poder es mejorado por el apoyo de otros proyectos tales como: Proj4 (Soporte en proyecciones), GEOS (Motor de Geometría de Código Abierto, que provee soporte en procesamiento de geometrías avanzado), GDAL (Librería de Abstracción de Información Espacial, que provee características de procesamiento avanzados para rasters) y CGAL/SFCGAL (Librería de Algoritmos Geométricos Computacionales, el cual permite análisis en 3D avanzados); la mayoría de estos proyectos incluyendo a PostGIS se encuentran bajo la sombra de la Fundación Geoespacial de Código Abierto (OSGeo), y además se encuentra bajo los estándares de OGC (Consorcio Geoespacial Abierto). PostGIS contiene 4 tipos espaciales claves (Obe & Hsu, 2015):

- ✓ Geometrías, los cuales son de tipo plano, fue el primer modelo y el mas popular, además que es la base para los otros tipos, usa la matemática cartesiana

- ✓ Geografía, es del tipo geodésico esferoidal, las líneas y polígonos son dibujados en la curvatura de la superficie de la tierra.
- ✓ Raster, es el tipo de celda multibanda, modela el espacio como una grilla rectangular de celdas, cada una conteniendo un valor numérico.
- ✓ Topología, es el modelo relacional, modela el mundo como una red conectada con nodos, lados y caras, se basa principalmente en redes y enrutamiento



CAPÍTULO III: **METODOLOGÍA**

III.I. Descripción del Área de Estudio

La irrigación Bajo Cural se encuentra delimitada políticamente por el departamento de Arequipa, provincia de Arequipa, distritos de Arequipa, Cayma, Hunter, Jose Luis Bustamante y Rivero, Sachaca, Tiabaya, Uchumayo, Yanahuara y Yura; a 2 km del centro de la ciudad, cuyas coordenadas geográficas decimales inferiores sur y oeste son equivalentes a -16.44° y $-71,67^\circ$, y coordenadas geográficas norte y este equivalentes a -16.37° y -71.54° ; la altitud media se encuentra entre los 2220.36 m.s.n.m.

III.I.I. Descripción de las parcelas de la irrigación Bajo Cural

La delimitación de las parcelas agrícolas de la irrigación Bajo Cural es proporcionada por la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada, la cual proporciona el catastro agrario y el inventario de infraestructura hidráulica reglamentado mediante la “RESOLUCION JEFATURAL N° 030-2013-ANA”, estableciendo el uso del DATUM WGS84 proyección UTM, y presentada en el formato de geodatabase de ESRI, esta geodatabase fue disgregada en shapefiles que permiten su interacción con otros softwares, esta delimitación se puede visualizar en la Figura 18.

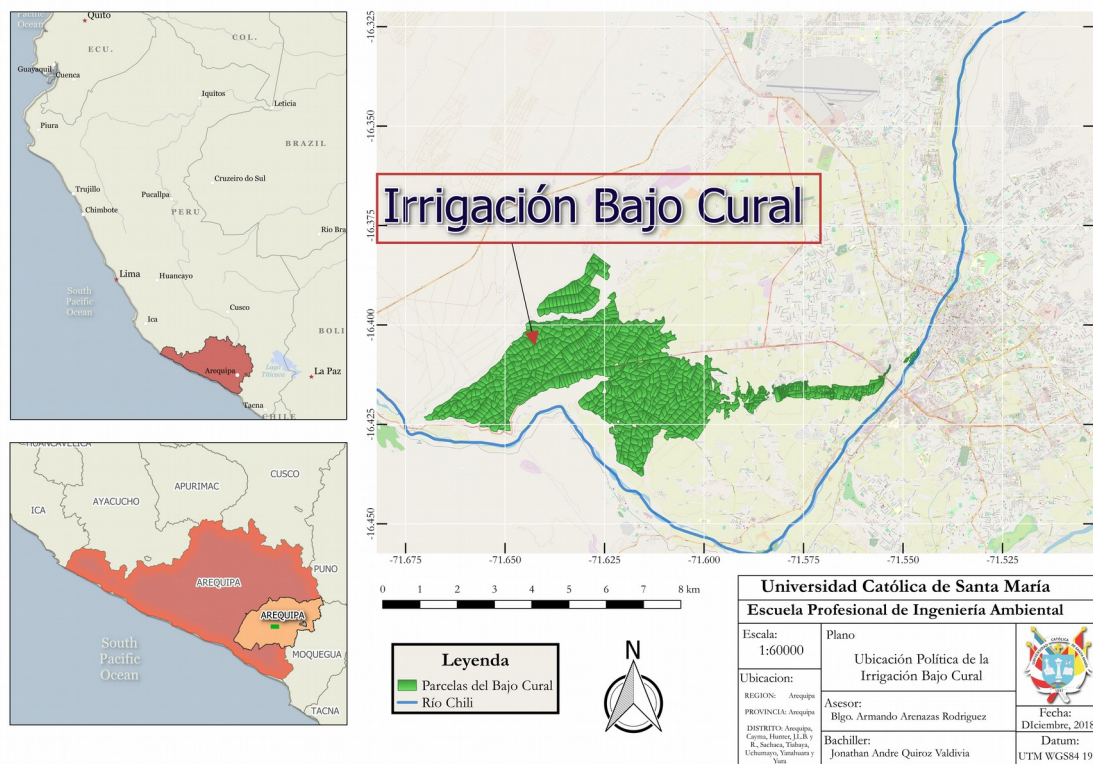


Figura 18: Ubicación Política de la Irrigación Bajo Cural

III.I.II. Descripción de las condiciones hidrológicas influyentes

Las condiciones hidrológicas son dominadas por las características de las cuencas hidrográficas, subcuencas y ríos definidos por la Autoridad Nacional del Agua, la cual se encuentra delimitada por la cuenca Quilca-Chili, dentro de la Sub cuenca “Medio Quilca-Vitor-Chili”, la cual ocupa 2334.60 km² (16.9% del total de la cuenca), las irrigaciones del Sistema Regulado Chili son abastecidas principalmente por el Río Chili, el cual nace de la confluencia entre el río Blanco y Sumbay con un caudal promedio de 10 m³/s, este caudal es regulado por el sistema de represas presentes en la cuenca.

III.I.III. Descripción del sistema hidráulico de la irrigación Bajo Cural

Con apoyo del inventario de infraestructura hidráulica de la irrigación Bajo Cural se pudieron identificar canales, tomas, estructuras de captación, estructuras de control, estructuras de medición y obras de arte presentes. Siendo entre todo ello lo más importante los canales, los cuales son analizados en función de sus laterales y las bocatomas que abastecen a la irrigación, estas a su vez se pasaron al formato shapefile.

III.I.IV. Descripción de condiciones climáticas en la estación Huasacache

Las condiciones climáticas son la base para el cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante el método Penman-Monteith establecido en el paper de la FAO N°56, para ello se obtuvo información meteorológica por parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) correspondiente a la estación “Huasacache”, siendo esta la estación más cercana a la irrigación Bajo Cural la cual proporciona información correspondiente a valores promedios mensuales de precipitación en mm/día, temperatura a las 7 (TM101), 13 (TM102) y 19 horas (TM103) en °C, temperatura de bulbo seco a las 7 (BS_TM104), 13 (BS_TM105) y 19 (BS_TM106) horas en °C, temperatura de bulbo húmedo a las 7 (BS_TM107), 13 (BS_TM108) y 19 (BS_TM109) horas en °C y velocidad de viento (VT107) en m/s., a los valores registrados se les extrae los máximos, mínimos y promedios, esto servirá a su vez para analizar la variación climática de la zona y permitir el manejo de escenarios optimistas, pesimista y más probable basados en la precipitación y temperatura con fines de prevención de riesgos como valores referenciales (Tzai-Hung et al., 2007). Las condiciones climáticas se procesaron con el lenguaje de

programación Python, y los paquetes Pandas (McKinney, 2010), NumPy (van der Walt, Colbert, & Varoquaux, 2011) y Matplotlib (Caswell et al., 2019) las cuales facilitan la manipulación, orden y análisis de la información de una manera rápida e interactiva. Las coordenadas geográficas de la estación Huasacache se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4: Ubicación de la estación meteorológica Huasacache

Estación Huasacache	
Latitud	16° 27' 27.87"
Longitud	71° 33' 58.85"
Altitud	2200

Fuente: Elaboración propia.

III.I.V. Descripción de la topografía de la zona

La topografía obtenida para el estudio corresponde al uso de imágenes satelitales del servidor AW3D perteneciente al satélite ALOS PRISM, siendo el satélite con mayor precisión respecto a otros satélites gratuitos, con una resolución espacial de 30 metros/píxel en la versión gratuita (Santillan & Makinano-Santillan, 2016)

Todos los archivos geospaciales fueron transformados a shapefiles y posteriormente analizados con QGIS v.3.6 (QGIS Development Team, 2009)

III.II. Modelos de requerimiento hídrico de cultivos

III.II.I. Evapotranspiración de referencia diaria

La evapotranspiración de referencia o de cultivo de referencia, se calculará para el periodo de Agosto 2017 a Julio 2018, estas fechas se escogieron con la finalidad de abarcar una rotación anual de cultivos y coincidir con el tiempo de 1 año en el cual fue evaluada la delimitación de bloque de riego del Bajo Cural. Se toma como cultivo de referencia el pasto, siendo este definido en el Paper N° 56 de la FAO (Pereira et al., 1998) y tablas referenciales (Trimble, 2008) las cuales implementan la ecuación de Penman-Monteith obteniendo la evapotranspiración en mm/día, este método es establecido por la FAO como un estándar, y está basada en el método de balance de energía presentado en la Ecuación II.11 que toma como cultivo de referencia el pasto. El método Penman-Monteith FAO 56 fue escogido por obtener mejores resultados comparado con otros métodos (Gotardo, Rodrigues, & Gomes, 2016)

Penman-Monteith toma un cultivo de referencia, entre los que han sido estudiados extensivamente se encuentran la alfalfa y el pasto, para los cuales se han calculados promedios y se obtiene que la altura equivale a 0.12m, la resistencia superficial 70 s/m, y el albedo 0.23. El desarrollo de la ecuación de Penman-Monteith según el paper N°56 de la FAO se presenta de la Ecuación II.10 a la Ecuación II.41

La delimitación temporal para el análisis fue de agosto del 2017 a julio del 2018 utilizando las variables otorgadas por SENAMHI de precipitación, temperatura, temperatura de bulbo húmedo y seco, velocidad de viento; y se acoplaron las horas de sol para la latitud sur a -16° detalladas por Ticona, (1996).

Para el caso de la velocidad de viento y temperatura de bulbo seco a las 7 y 19 horas se encontraron fechas sin información, por lo que se rellenaron con valores promedios del tiempo de estudio, al ser el procesamiento único por mes se realizaron los cálculos en una hoja de cálculo Excel.

III.II.II. Evapotranspiración de referencia horaria

Una vez realizado el cálculo de la evapotranspiración de referencia diaria se procede a calcular la evapotranspiración de referencia horaria, para ello se usarán la mayoría de las ecuaciones para el cálculo de la evapotranspiración de referencia diaria, pero a diferencia se aplica la ecuación II.42, la cual cambia algunas variables tales como la temperatura horaria, adicionalmente se cambia la ecuación para el cálculo de la radiación extraterrestre (R_a) tomando la ecuación II.43, la cual incluye el cálculo del factor de corrección estacional para el tiempo solar descritos en la ecuación II.47 y II.548 los cuales sirven para el cálculo de la ángulo de tiempo solar descrito en la ecuación II.46, la cual a su vez es base para el cálculo del ángulo de tiempo solar de inicio y fin según la ecuación II.54 y II.55, adicionalmente se aplican los cambios descritos previamente en algunas constantes por el cambio de unidades de tiempo como es descrito por (Pereira et al., 1998), al ser el procesamiento único por mes se realizaron los cálculos en un hoja de cálculo Excel.

Debido a que la información proporcionada por SENAMHI es a escala diaria y no horaria, se usó la información correspondiente a promedios mensuales para las 13 horas

III.II.III. Evapotranspiración actual según SEBAL

Debido a que el cálculo de la evapotranspiración con el método de Penman-Monteith toma un cultivo referencial y no proporciona una distribución espacial de la evapotranspiración que permita visualizar las diferencias entre cultivos ni las áreas afectadas por la evapotranspiración, se procedió a calcular la evapotranspiración actual con el Algoritmo de Balance Superficial de Energía para Suelo (SEBAL), el cual está basado en el cálculo del residuo de balance de energía mediante imágenes satelitales, este algoritmo obtiene resultados detallados que los propuestos por la ecuación de Penman-Monteith (Ramos et al., 2005), para el cálculo de SEBAL se necesitarán imágenes del satélite Landsat 8, tomando las imágenes de los sensores OLI y TIRS (Bruno Bonemberger da Silva, Mercante, Boas, Wrublack, & Oldoni, 2018), siendo estas imágenes obtenidas gratuitamente y la diferencia entre los sensores es la resolución y el satélite TIRS obtiene imágenes termales, obteniendo mejores resultados con SEBAL que con los propuestos por la FAO (Pereira, Allen, Smith, & Raes, 2015), y promovidos por la Unión Europea para la administración de la agricultura (Unión Europea, 2018).

Las imágenes de Landsat 8 serán descargadas del servidor “Earth Explorer” del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) estando estas en el nivel de procesamiento L1TP, los cuales son valores digitales, se necesitará aplicar corrección atmosférica, la descarga de las escenas se limita al área de estudio y a la fecha de interés (agosto del 2017 a julio del 2018), se toma como referencia el CAMINO (PATH) 003 y la FILA (ROW) 071, se filtra las imágenes obtenidas en función de la nubosidad. Al ser el área de estudio pequeña comparada con el tamaño de la imagen no se colocó un filtro automático, si no, se visualizó cada imagen dentro del periodo indicado con

el fin de visualizar la presencia de nubes en la zona de estudio, mencionando lo anterior se tiene la siguiente tabla con las imágenes usadas y la nubosidad respectiva, observando que para el mes de febrero no se lograron encontrar imágenes sin nubosidad ya que sobrepasaban el 60% de área cubierta.

Para el procesamiento de las correcciones atmosférica y la temperatura de brillo de las imágenes del satélite Landsat8 se usó el software GRASS GIS versión 7.4.1 (GRASS Development Team, 2018), el cual facilita el procesamiento de la información geográfica especialmente en formato raster mediante una serie de algoritmos de código libre, además para el presente trabajo se utilizó la extensión de Python versión 2.7.5 de GRASS GIS, con el cual se automatizó el procesamiento de las imágenes apoyando el desarrollo de las líneas de comando en la línea de código desarrollada por (Wolff, 2016), las líneas de comando para procesar SEBAL se encuentran en el Anexo 5, pág. 154-167; se proyectaron al DATUM WGS84 19S, la corrección atmosférica requiere el cálculo de los valores de radiancia (L_{λ}), la temperatura de brillo en el tope de la atmósfera mediante los valores proporcionados en el metadato de las imágenes y los cálculos se realizan mediante las Ecuaciones II.1 y II.2 respectivamente. Posteriormente se realiza la corrección atmosférica mediante el método DOS1 según la Ecuación II.4, se escoge este método debido a que es el más sencillo y debido a que SEBAL ya equilibra los efectos atmosféricos (Waters et al., 2002), la cual necesita los valores de radiancia (L_{λ}), la distancia entre la superficie y el satélite (d) obtenida del metadato, la transmitancia atmosférica en dirección de visión (T_v) y la transmitancia atmosférica en dirección de la iluminación (T_z) que se igual a 1 en DOS1, y la irradiancia difusa (E_{down}) es igual a 0 en DOS1, el ángulo cenital (θ_s) y la radiancia espectral atmosférica dispersada (L_p) la cual se calcula mediante la Ecuación II.5 y requiere la radiancia mínima calculada mediante la Ecuación II.6 y la radiancia del objeto oscuro (L_{DOI}) calculada mediante la Ecuación II.7.

Finalizada las correcciones atmosféricas se adicionó las líneas de código correspondientes a SEBAL, para lo cual las imágenes obtenidas por el satélite Landast 8 una vez ya corregidas atmosféricamente y se recortaron en función del área de las parcelas, dejando 200 metros de margen en cada contorno, esto con el fin de reducir el tiempo de cálculo enfocando el procesamiento en nuestra área de interés.

SEBAL requiere de variedad de parámetros, estos se basan en el flujo de calor del suelo (G), el flujo de calor sensible (H) y la radiación neta (Rn), el procedimiento completo se presenta de la Ecuación II.49 a la Ecuación II.84.

La radiación neta (Rn) se expresa en la Ecuación II.50 basada en un balance de las radiaciones de onda corta y larga incidentes y reflejadas, como se describe en la Figura 19.

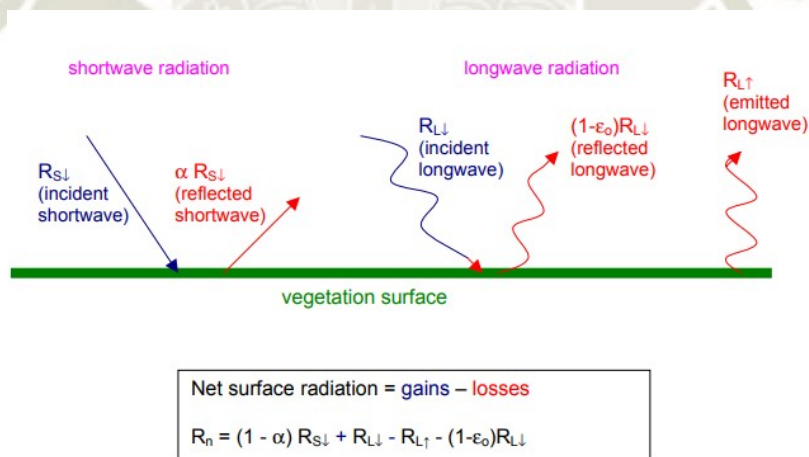


Figura 19: Balance de energía para el cálculo de la radiación neta (R_n) (Waters et al., 2002)

El flujo de calor del suelo G requiere del cálculo del albedo, del NDVI mediante la Ecuación II.56, y de los valores obtenidos por la radiación neta (R_n).

El flujo de calor sensible (H) requiere de un proceso iterativo el cual calcula la velocidad de fricción a 200 metros a nivel puntual en la estación meteorológica de estudio para luego derivar la velocidad de fricción como mapa y poder calcular una resistencia atmosférica al transporte de vapor base, esta iteración se hace con el fundamento de las ecuaciones II.61 y II.62. Este proceso se describe en la Figura 20.

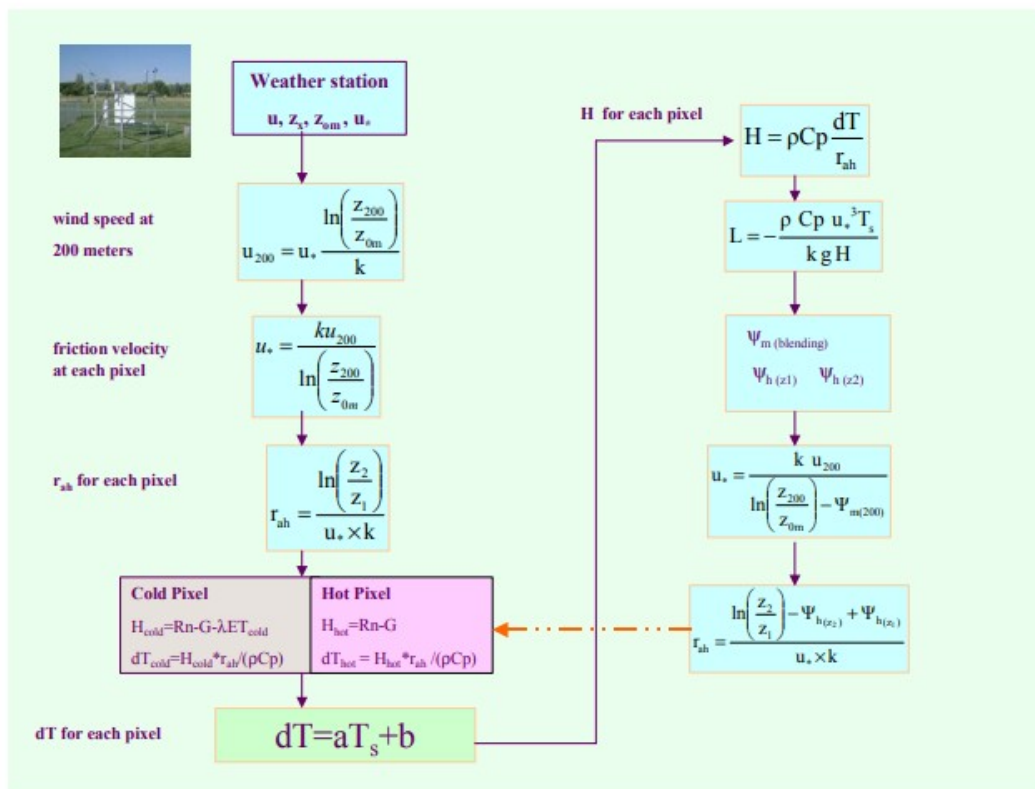


Figura 20: Proceso iterativo para el cálculo del flujo calor sensible (Waters et al., 2002)

Se prosiguió con el cálculo de la evapotranspiración instantánea ($E_{t,inst}$) mediante la Ecuación II.82, la cual requiere el flujo de calor latente (λET) y el valor de λ el cual se calcula mediante la Ecuación II.83 en función de la temperatura superficial en grados Kelvin.

El cálculo de la temperatura superficial es útil para el análisis de islas de calor como es mencionado por Kaplan, Avdan, y Avdan, (2018), los cuales utilizaron imágenes satelitales provenientes de Landsat 8, este procedimiento es aplicado en el proyecto llamado “IDENTIFICACIÓN DE ISLAS DE CALOR MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES TÉRMICAS, MULTIESPECTRALES Y DRONES COMO APOYO A LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AREQUIPA”, en el cual el autor participa como tesista y asistente.

Para la extrapolación de la evapotranspiración actual instantánea a diaria se requiere el uso de la Ecuación II.84 para el cálculo de la fracción de ET de referencia ($E_{t,F}$), la cual está relacionada con los valores de coeficiente de cultivo, para ello será necesario el uso de la evapotranspiración de referencia en en mm/hora y mm/día.

III.II.IV. Características del suelo

Como característica principal del suelo se tiene el cálculo de Punto de Marchitez Permanente (WP) y la Capacidad de Campo (FC), estos parámetros son calculados en base a las ecuaciones basadas en regresiones lineales de Saxton y Rawls (2006), por lo que se utilizaron las ecuaciones II.93, II.94, II.95 y II.96 para el cálculo de ambos parámetros, siendo necesario para ello el cálculo del porcentaje en peso de grabas, arenas, arcillas y materia orgánica de un punto representativo de la zona de estudio del bajo Cural, por lo que se recolectó la muestra de la zona de mayor acceso

de un terreno agrícola, sin la existencia de un patrón a seguir según Mbah (2012), la toma de muestra se realizó siguiendo el estándar para la toma de muestras para el cálculo de FC y WP según García, Puppo, Hayashi, y Morales, (2012), por lo que se demarcó un área cuadrada de 1 metro de arista, se removió toda la vegetación superficial, se hizo una demarcación de los contornos del área con la tierra y por consiguiente se procedió a extraer una muestra de 25 kg de suelo según lo solicitado por el laboratorio de suelos y concreto Coaquira Hnos., el cuál realizó los ensayos de granulometría, límites de consistencia, humedad natural y materia orgánica del suelo, la profundidad de la toma de muestra no excedió los 20 cm de profundidad, una vez obtenida la muestra se procedió a entregarla al laboratorio de suelos.

Se escogió un único punto de muestreo para obviar el uso de los valores por defecto propuestos por la FAO, escogiéndose una parcela del Lateral 7 debido a que este es el lateral de mayor tamaño, el muestreo se realizó en el Lote 553 el 9 de noviembre del 2018, para el momento de la toma de muestra se encontraba el suelo desnudo con una cosecha previa del cultivo de Alverja combinado con plantones de Palto de año y medio (Anexo 17, pág 191). La ubicación del punto de muestreo con referencia a la extensión de la irrigación se visualiza en la Figura 21.

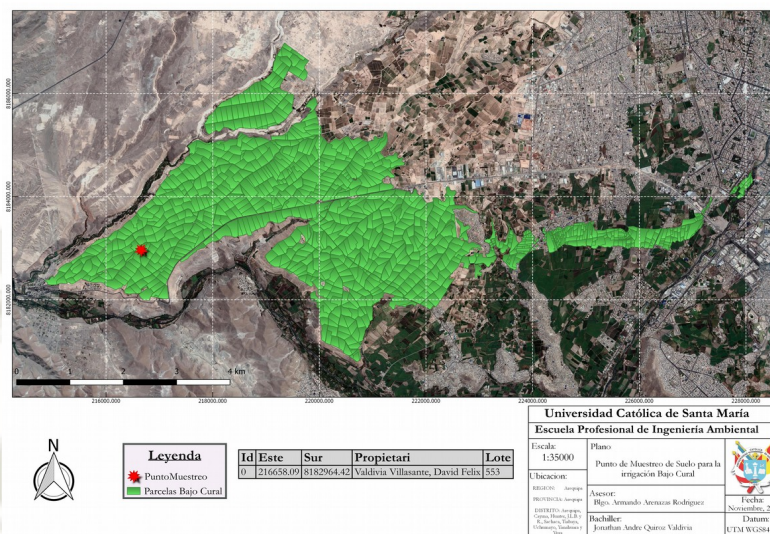


Figura 21: Punto de Muestreo de Suelo en el Lateral 7, Lote 553 de la Irrigación Bajo Cural

Con la base del análisis realizado por el laboratorio se determinaron los parámetros de suelo necesarios para los requerimientos hídricos de los cultivos, esto se realiza usando el software desarrollado por los mismos “Soil Water Characteristics versión 6.02.74” el cual ofrece una interfaz gráfica intuitiva con el usuario Saxton y Rawls, (2006).

III.II.V. Cálculo de las Necesidades Hídricas de los Cultivos según datos de evapotranspiración correspondientes a Penman-Monteith y SEBAL

Las Necesidades Hídricas de los Cultivos están regidas por la Ecuación II.97, en la cual se requiere la obtención previa del coeficiente de cultivo (k_c), la evapotranspiración potencial (ET), la precipitación efectiva y el agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo al final del día (p). Para extraer los valores de evapotranspiración y definir los cultivos presentes en la zona de estudio se realizaron 2 campañas de encuestas a agricultores

que se encontraron en sus parcelas, tomando la ubicación del lote y los cultivos durante el tiempo de estudio delimitado, estas encuestas están basadas en el formato de intenciones de siembra propuesto por el MINAGRI (MINAGRI, 2018).

Los cálculos de las necesidades hídricas requieren balances de agua diarios, por lo que se usa el lenguaje de programación Python v.3.6.5 adaptado mediante el software Anaconda v.4.5.11, como interfaz gráfica se emplea Jupyter Lab, el cual nos permite visualizar y editar continuamente las líneas de código y resultados obtenidos; se requiere del uso de las librerías Numpy para el uso de funciones matemáticas, Matplotlib para obtener gráficos, Os para manejar las rutas del sistema, Datetime y Calendar para manipular las variables relacionadas con fechas, Scipy para realizar interpolaciones de valores y por último Pandas para leer y exportar cualquier documento de texto u hoja de cálculo.

Los cultivos a identificar y los coeficientes de cultivo (k_c) han sido recopilados del informe de delimitación de bloque de riego para el Bajo Cural, del mismo modo se extrajeron los días de cada periodo vegetativo de cada cultivo de este informe, no obstante, algunas periodos de cultivos no encajaban con lo encuestado y se interpolaron las fechas acomodando la duración total de días con lo encuestado, se extraen también los días que dura cada periodo vegetativo de cada cultivo, la profundidad radicular y la fracción de agotamiento crítico (Autoridad Local del Agua Chili, 2015). Los tiempos establecidos para los periodos de crecimiento de los cultivos que tengan diferencias serán interpolados en función de la duración de los periodos establecidos para la delimitación de bloque de riego

Con el uso del lenguaje de programación Python se introdujeron los cultivos en forma de diccionario (Anexo 19, pág. 193-198), se crean matrices de los

días de los cultivos, con el apoyo de la librería Scipy (Jones, Oliphant, Peterson, & others, 2001).se interpolaron los valores para coeficientes de cultivo, profundidad de raíces y la fracción de agotamiento obteniendo valores para cada día del año según la evapotranspiración de referencia (Anexo 11, pág 173-177) y la evapotranspiración actual (Anexo 12, pág 178-183), además se interpolaron los valores de febrero con una función cuadrática. El Punto de Marchitez Permanente (PMP) y la Capacidad de Campo se tomaron como valores estáticos según lo obtenido por las ecuaciones de Saxton y Rawls (2006). Los valores de Agua Disponible Total (ADT) dependen de la profundidad de raíces, por lo que se obtienen valores diferentes para cada cultivo durante todo su periodo vegetativo, de igual forma, el Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) depende de ADT y de la fracción de agotamiento crítico, obteniendo valores diarios. Los valores de precipitación y evapotranspiración se cargaron a Python desde una hoja de cálculo, obteniendo valores mensuales acumulados para la precipitación efectiva y para la evapotranspiración un valor promedio para cada mes, estos valores se filtraron según las fechas en las que se siembra cada cultivo obteniendo valores diarios correspondiente al periodo vegetativo de cada cultivo.

El cálculo de la precipitación efectiva se calcula mediante el método USDA-SCS, el cuál según (Dastane, 1978), es apropiado para zonas áridas con escasa información del suelo y de los cultivos, tiene una precisión media y no requiere costos altos, es buena para precipitación de baja intensidad y alta tasa de infiltración propia de cultivos agrícolas, para ello se emplea la Ecuación II.8, la cual requiere del cálculo de un factor y de la evapotranspiración, el factor está definido por la Ecuación II.9 en función del almacenamiento de agua disponible (ADA). Debido a que el cálculo de la precipitación efectiva mediante el método de USDA-SCS se calcula con valores promedio mensuales y la información proporcionada por SENAMHI

se encuentra en valores acumulados mensuales, se dividió la información provista entre el número de días de cada mes, de igual manera se automatizan los cálculos para la generación de los modelos, estos a su vez varían según la evapotranspiración tomada ya que es una variable que se incluye en el cálculo de la precipitación efectiva.

El agotamiento de la humedad en la zona radicular del suelo al final del día (p) se expresa mediante la Ecuación II.99, la cual requiere del cálculo del agotamiento de un día anterior mediante la ecuación II.100 en función de la capacidad de campo y la profundidad de raíces, y por último la humedad inicial almacenada en el suelo.

Se puede calcular la cantidad de Agua Disponible Total (ADT) y la cantidad de Agua Fácilmente Aprovechable (AFA). ADT es calculada mediante la Ecuación II.91, la cual requiere parámetros de FC, WP y la profundidad de raíces; AFA es calculada con la Ecuación II.92, la cual requiere del valor ADT y del agotamiento crítico (p) calculado mediante la ecuación II.86 en función de la evapotranspiración y valores de agotamiento crítico propuestos por Pereira, Allen, Raes, y Smith, (1998), para evapotranspiraciones equivalentes a 5 mm/día, se calcula la cantidad de agua en función de láminas de riego en mm (FAO, 1986), y también los requerimientos hídricos en base a SEBAL (El-Magd & Tanton, 2005).

Los cálculos de las Necesidades hídricas según los valores calculados con Penman-Monteith requieren de la evapotranspiración de cultivo y la precipitación efectiva, estos valores se calculan diariamente y se agrupan mediante valores mensuales correspondientes a los valores vegetativos de cada cultivo con el fin de comparar los volúmenes de agua generados.

Estimados las necesidades hídricas de los cultivos según los lineamientos de la FAO se procede a calcular las necesidades hídricas en función de las evapotranspiración actual calculada mediante SEBAL, para ello se filtran las encuestas que no proporcionaban una adecuada información y se asignaron codificaciones alfabéticas para diferenciar las tabladas, seguidamente se obtuvieron centroides de cada tablada, posterior a ello se hace uso del complemento de QGIS “Point Sampling Point” para obtener los valores intersecados de cada punto con los rasters de evapotranspiración actual, así se obtiene una tabla de datos con la evapotranspiración correspondiente a cada imagen satelital procesada por centroide de cada tablada.

Existen casos particulares como el del lote 553 que comprende una combinación de cultivos, mientras se cultiva palto se tiene la presencia de cebolla, este efecto puede estar teniendo efectos mezclados para los valores de evapotranspiración actual.

Para el caso de cultivos con múltiples imágenes por mes se procederá a filtrar las fechas que tengan valores equivalentes a 0, estos valores pueden estar alterados por algún tipo de nubosidad influyente, el tamaño del píxel general y el tamaño de píxel correspondiente a las bandas termales, para el caso de meses que tengan 2 datos se selecciona el más adecuado o se promediaran los valores

El procesamiento de las necesidades de riego aplicando datos de evapotranspiración actual mediante SEBAL es replicado de las líneas de código usadas con Penman-Monteith, a excepción que para interpolar los valores de evapotranspiración actual se ha utilizado una función cuadrática con el fin de simular el comportamiento de la evapotranspiración en vez de tomar valores únicos para cada mes.

Se realiza descripciones gráficas de los resultados según cada método de cálculo de evapotranspiración, en cada gráfico se presentan como límites en el eje de las ordenadas se encuentra la capacidad de campo (CC) que viene a ser el valor equivalente a 0, seguido del Agua Fácilmente Aprovechable (AFA), y el Agua Disponible Total (ADT), como resultado se obtiene una descripción gráfica de cuánta agua debe ser irrigada y cada cuánto tiempo en días en cada cultivo en forma de agotamiento, teniendo como condición que la lámina de riego aplicada no llegue a sobrepasar el valor de AFA, debido a que pasando el límite de AFA corresponde a agua ligada a la matriz del suelo y la planta empieza a sufrir estrés (Pereira et al., 1998, p. 56).

La distribución de los volúmenes de agua según la evapotranspiración referencial de Penman-Monteith es uniforme para todos los cultivos repetidos, por lo que se sacarán promedios valores obtenidos a los cultivos repetidos con el fin de tener volúmenes únicos para cada cultivo, y para el caso de SEBAL se tomarán más consideraciones, esto debido a la posible incertidumbre en las encuestas, el tamaño de las tabladas o parcelas seleccionadas, las cuales no otorguen valores representativos debido a su tamaño y el píxel no esté interpretando adecuadamente al cultivo o la parcela, obteniendo así volúmenes únicos para cada cultivo.

III.III. Análisis de las eficiencias de riego

III.III.I. Eficiencia del sistema hidráulico

La eficiencia de riego para el sistema de conducción es calculada mediante la Ecuación II.93, tomando como área principal los laterales del 1 al 8 del Bajo Cural y calculando los valores de eficiencia de conducción, eficiencia de distribución y eficiencia de aplicación; la limitación se realizó a estas zonas debido a que son las principales fuentes de demanda de agua, antes del

Lateral 1 se encuentran parcelas dispersas pertenecientes al sector Huaranguillo las cuales no fueron consideradas por la dificultad de acceso y los canales que las alimentan son muy dispersos, esta información se recopilará del proyecto SNIP (Comisión de Bajo Cural, 2008), del Plan de Gestión de Recursos hídricos de la Cuenca Quilca-Chili (ANA et al., 2013) y además será calculada en campo según los lineamientos del MINAGRI (MINAGRI, 2015a) con el uso del perfilador móvil de flujo acústico de la marca AquaProfiler® M PRO, siguiendo la metodología con la que fue diseñada el instrumento escogiendo intervalos de medición de 0.5 metros para el cálculo de eficiencias de conducción y para la eficiencia de distribución se escogieron intervalos de medición de 0.25 metros (Anexo 18, pág. 192).

La eficiencia de conducción se calcula mediante la Ecuación II.94 en función de los laterales presentes en el bajo cural con los datos obtenidos por el velocímetro y en función de las características de los canales otorgados por la Junta de Usuarios Chili Zona Regulada. La eficiencia de distribución se calculó basado en la Ecuación II.95, se tomó únicamente del canal perteneciente al Lateral 7 debido a que era el canal más abundante y donde se pudo tomar un mejor dato representativo. Por último, la eficiencia de aplicación se calculó en función de la Figura 13 en función de valores de eficiencias propuestos por el MINAGRI. posteriormente se calculará el volumen total necesario por mes, este valor está basado en la lámina de riego, la eficiencia de aplicación y el área de riego.

III.III.II. Comparación de las eficiencias de riego

Con los datos de eficiencia total del sistema se pudieron calcular los volúmenes necesarios por la irrigación Bajo Cural basados en la evapotranspiración según Penman-Monteith y SEBAL, y adicionalmente se

pueden comparar con lo requerido actualmente implementado por la delimitación del bloque de riego del Bajo Cural. La porción de área bajo riego al ser un sistema regulado será 100% pero esto puede variar en caso de situaciones de emergencia, pudiéndose así regular el caudal para agricultura, caso que esto será en situaciones de emergencia ya que en el Perú la Agricultura esta después de la población afectando así directamente a la industria en estas situaciones, obteniendo así el área real de riego o área total, el cual resulta de la multiplicación de la porción de área bajo riego y el área total de los lotes (Flores, 2018).

III.IV. Base de Datos

La información es conceptualizada en una base de datos SQL (Structured Query Language) la cual nos servirá para realizar consultas y procesamiento de información espacial, esta facilita tener distintos tipos de información y a su vez integrarlos unos con otros fácilmente. (Falahah & Ayuningtias, 2014), se escogió PostgreSQL como base datos debido a su facilidad de acoplarse con lenguajes de programación y su eficiencia al manejar la información (Neuwirth, 2017), siendo esta infraestructura de software libre basada en los estándares del Consorcio Libre Geoespacial (OGC) (Jeppesen, Ebeid, Jacobsen, & Toftegaard, 2018), adicionalmente se añadió la extensión PostGIS para añadir el catastro de las parcelas de la irrigación

La base de datos desarrollada lleva el nombre de “tesis”, dentro de la cual se acoplaron la extensión PostGIS y se añaden las tablas de Excel correspondientes al rol de riego y el catastro agrario de la irrigación Bajo Cural, este último adiciona las parcelas como geometrías en formato WKT.

Posterior a ello se realizan verificaciones de la información con el fin de evaluar las dos fuentes de información, esto consiste en unir ambas tablas y tomar como atributo de comparación el número de lote, y finalmente se

compara el área de riego indicada por el rol de riego con respecto a la calculada por PostGIS,

Debido a que se trabaja únicamente con los laterales del 1 al 8, se eliminaron los registros que no pertenezcan a estos laterales del rol de riego. Toda la información se pasa a PostgreSQL mediante la librería psycopg2 de Python, adicionalmente se usa Matplotlib y Pandas.



CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.I. Variables espaciales y físicas

IV.I.I. Descripción de las parcelas de la irrigación Bajo Cural

Basado en la información catastral proporcionada por la Junta de Usuarios del Chili Zona Regulada, en la irrigación Bajo Cural se encuentran 1064 parcelas con un área mínima entre 0.01 y 6.3 ha, con un promedio total de área equivalente a 1.76 ha, un percentil 50 equivalente a 2.18 ha, y una sumatoria total de las áreas equivalente a 1868.68 ha, de esta manera se identifica que la distribución de las áreas de las parcelas no son uniformes, si no, varían en la distribución de la irrigación; la distribución de las parcelas se puede visualizar en la Figura 22

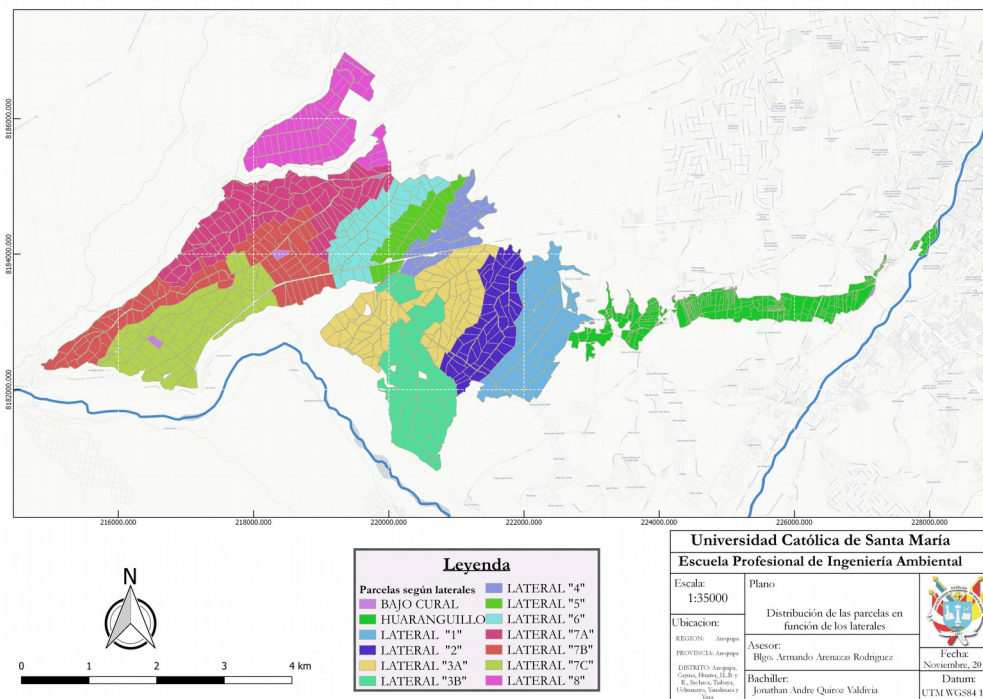


Figura 22: Parcelas de la irrigación Bajo Cural según laterales

IV.I.II. Descripción del sistema hidráulico de la irrigación Bajo Cural

Con apoyo del inventario de infraestructura hidráulica de la irrigación Bajo Cural se pudieron identificar canales, tomas, estructuras de captación, estructuras de control, estructuras de medición y obras de arte presentes, entre todo ello lo más importante son los canales, los cuales se dividen por laterales o por órdenes asignados, dentro del Bajo Cural se encuentran 8 laterales principales y pequeñas subdivisiones adicionales que se hacen en la distribución, en la tabla 5 se muestra la cantidad y clasificaciones presentes en la infraestructura hidráulica:

Tabla 5: Resumen de la Infraestructura hidráulica presente en el Bajo Cural

	Cantidad	Clasificaciones
Canales	205	Laterales 1 al 8
Tomas	2196	----
Desarenador	3	----
Bocatomas	1	----
Compuertas	304	Gusano o Tarjeta
Medidores	12	Parshal o RBC
Obras de arte	447	Acueductos, alcantarilla, caídas, mantanales, partidoras y vertederos

Fuente: Elaboración Propia

La bocatoma que abastece el sistema Bajo Cural se encuentra en las coordenadas UTM zona 19S 228252.08 m.E. 8184648.97 m.S., es

permanente y está construida con concreto, capta agua directamente del río Chili y contiene un caudal máximo de diseño equivalente a 2.7 m³/s. Los laterales presentes en la irrigación se pueden diferenciar por ser canales de derivación, canales cubiertos, canales internos, túneles, y cada uno de estos tiene variaciones según estén revestidos o no, en la Figura 23 se visualiza el mapa con la distribución de los canales, las tomas y las bocatomas.

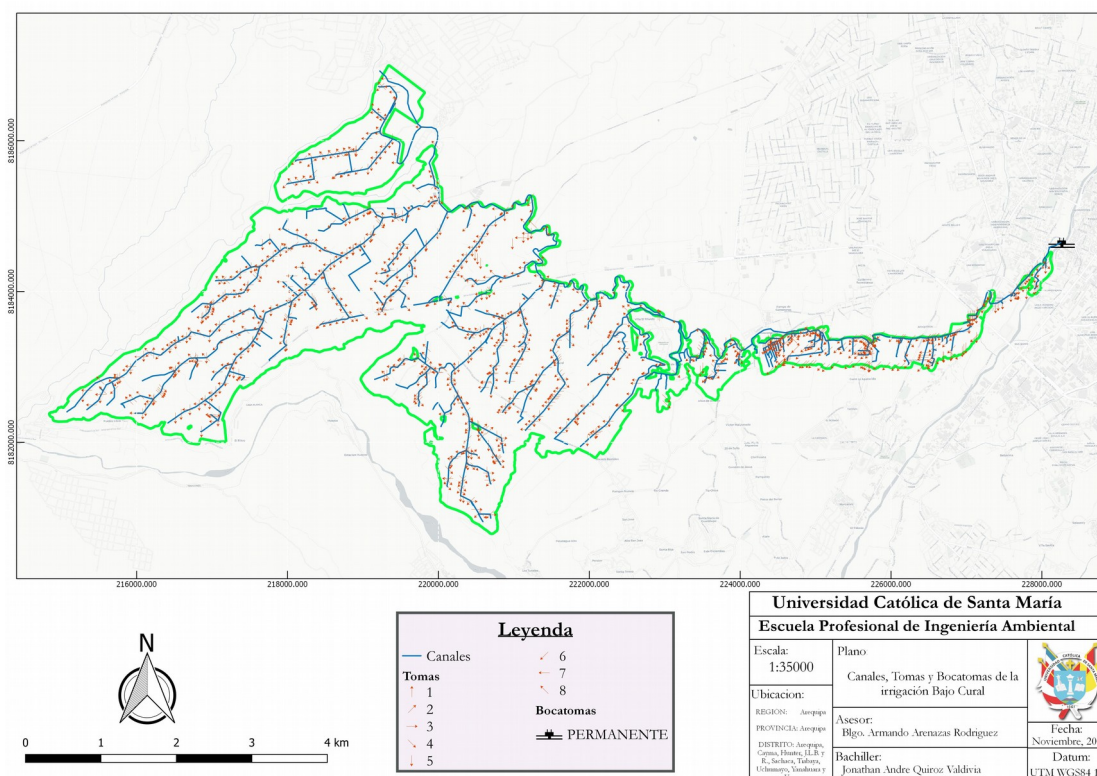


Figura 23: Canales, tomas y bocatomas presentes en la irrigación Bajo Cural

IV.I.III. Descripción de condiciones climáticas en la estación Huasacache

La precipitación para la zona de estudio se tiene un promedio en todos los periodos equivalente a 6.18 mm/día y un máximo de 148 mm/día correspondiente a la fecha del 1 de enero del 2012, se visualiza además que

la mayoría de los valores son equivalentes a cero, esto se evidencia con el percentil 50 que equivale a 0 y el percentil 75 que equivale a 1.05 mm/día, la distribución de la precipitación desde el 1 de enero de 1993 a el 2 de agosto del 2018 se muestra en la Figura 24.

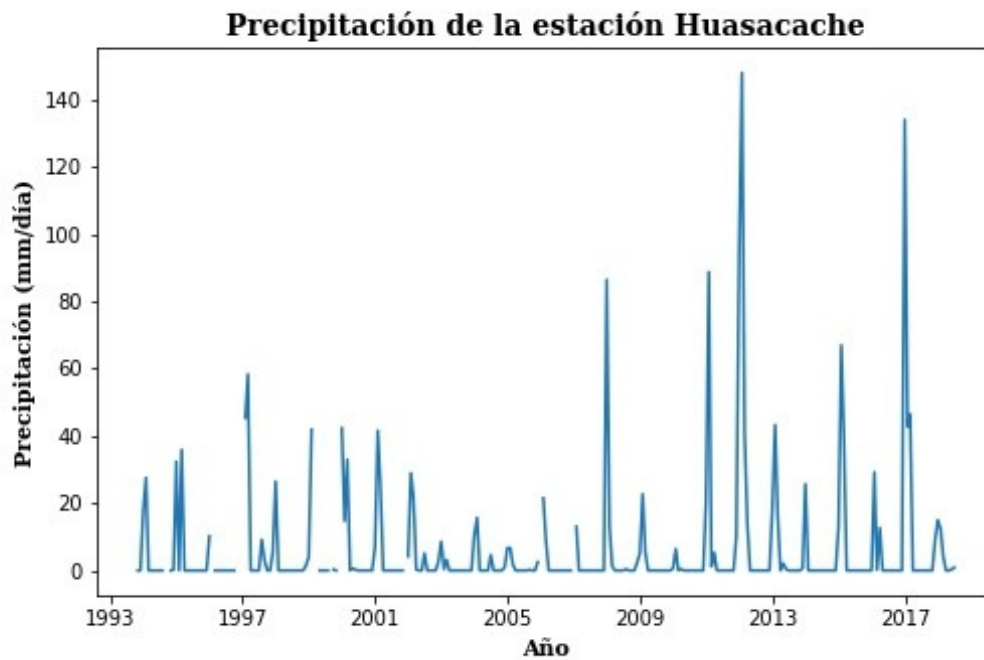


Figura 24: Precipitación en mm/día en la estación "Huasacache".

La velocidad del viento en la zona de estudio se puede visualizar en la rosa de viento en la Figura 25, los valores están desde el enero de 1993 a agosto del 2018, se puede visualizar que la predominancia del viento es Estesudeste, con un promedio equivalente a 3.48 m/s

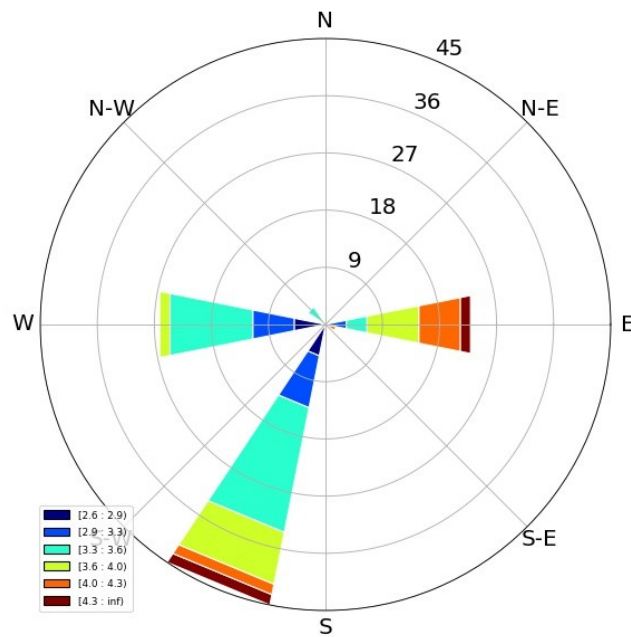


Figura 25: Rosa de viento correspondiente a la estación Huasacache

La temperatura a las 7 horas mínima y máxima corresponde a 12.48 y 19.26°C, la temperatura a las 13 horas mínima y máxima corresponde a 20.07°C y 25.43°C y la temperatura mínima y máxima a las 19 horas corresponde a 5.06°C y 13.40°C, siendo estas variaciones influenciadas por las variaciones climáticas del año, de igual forma las temperaturas de bulbo húmedo y seco se registran para las 7, 13 y 19 horas, observando variaciones a lo largo de los años y las estaciones, todas las variables de temperatura están representadas en la Figura 26

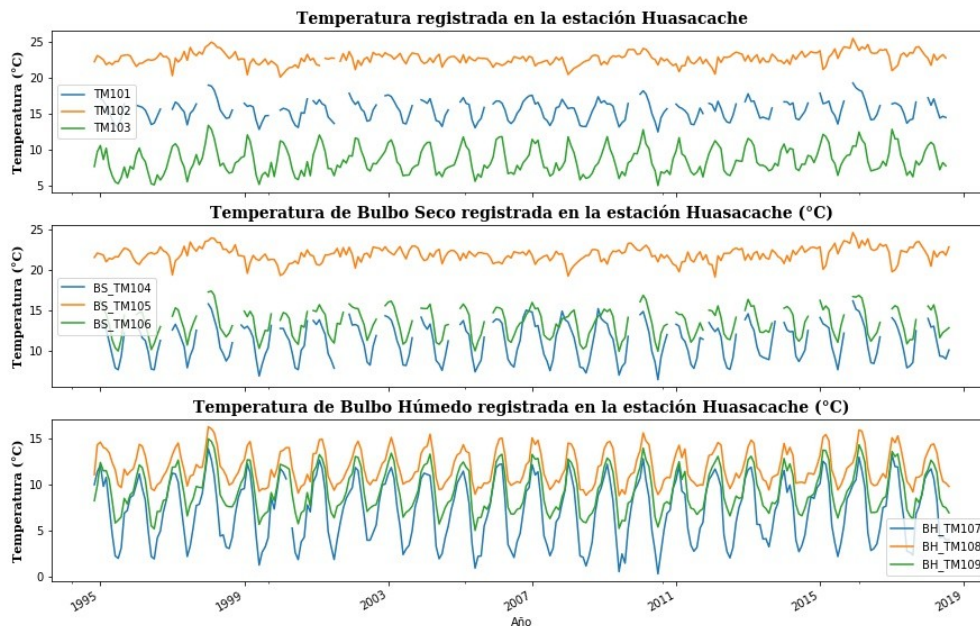


Figura 26: Temperatura, Temperatura de bulbo seco y Temperatura de bulbo Húmedo en la estación “Huasacache”

Los estadísticos de todas las variables meteorológicas resumidos se encuentran representadas en la Tabla 6, donde se presentan la cantidad de valores registrados como conteos, los promedios, la desviación estándar, los valores mínimos y máximos y los percentiles 25, 50 y 75 (P25, P50 y P75).

Tabla 6: Conteo de datos registrados, promedio, desviación estándar, mínimo, máximo, percentil 25, 50, 75 en la estación "Huasacache"

	Precipitación	TM101	TM102	TM103	VT107	BS_TM104	BS_TM105	BS_TM106	BH_TM107	BH_TM108	BH_TM109
Conteo	284.00	233.00	283.00	285.00	60.00	237.00	286.00	237.00	285.00	286.00	286.00
Promedio	6.18	15.55	22.65	8.59	3.48	11.25	21.96	13.55	7.23	11.91	9.44
Desv. Estándar	17.96	1.34	0.85	1.80	0.40	2.24	0.90	1.76	3.37	1.85	2.34
Mínimo	0.00	12.48	20.07	5.06	2.60	6.44	19.17	9.95	0.31	8.78	5.02
P25	0.00	14.42	22.11	7.21	3.20	9.32	21.40	12.08	4.19	10.31	7.50
P50	0.00	15.67	22.67	8.23	3.50	11.58	22.03	13.73	7.64	11.57	8.96
P75	1.05	16.48	23.18	9.96	3.80	13.08	22.53	15.04	10.14	13.59	11.57
Máximo	148.00	19.26	25.43	13.40	4.30	16.21	24.67	17.42	13.87	16.25	14.94

Fuente: Elaboración Propia

IV.I.IV. Descripción de la topografía de la zona

Dentro de la zona de estudio se tiene una elevación máxima de 2411 m.s.n.m., una elevación mínima de 1943 m.s.n.m., un valor promedio de 2220.35 m.s.n.m., estos valores son calculados para la extensión rectangular de la imagen, esto ocasiona que el rango entre el valor mínimo y máximo de elevación sea extenso, esto debido a la presencia de quebradas como la de Añashuayco que se encuentra al Noroeste de la irrigación; la importancia de este archivo está en que sirve como base para el cálculo de las variables implícitas en el cálculo de la evapotranspiración actual como la transmisividad de onda corta del aire, la distribución de la elevaciones y una vista en 3D se puede visualizar en la Figura 27

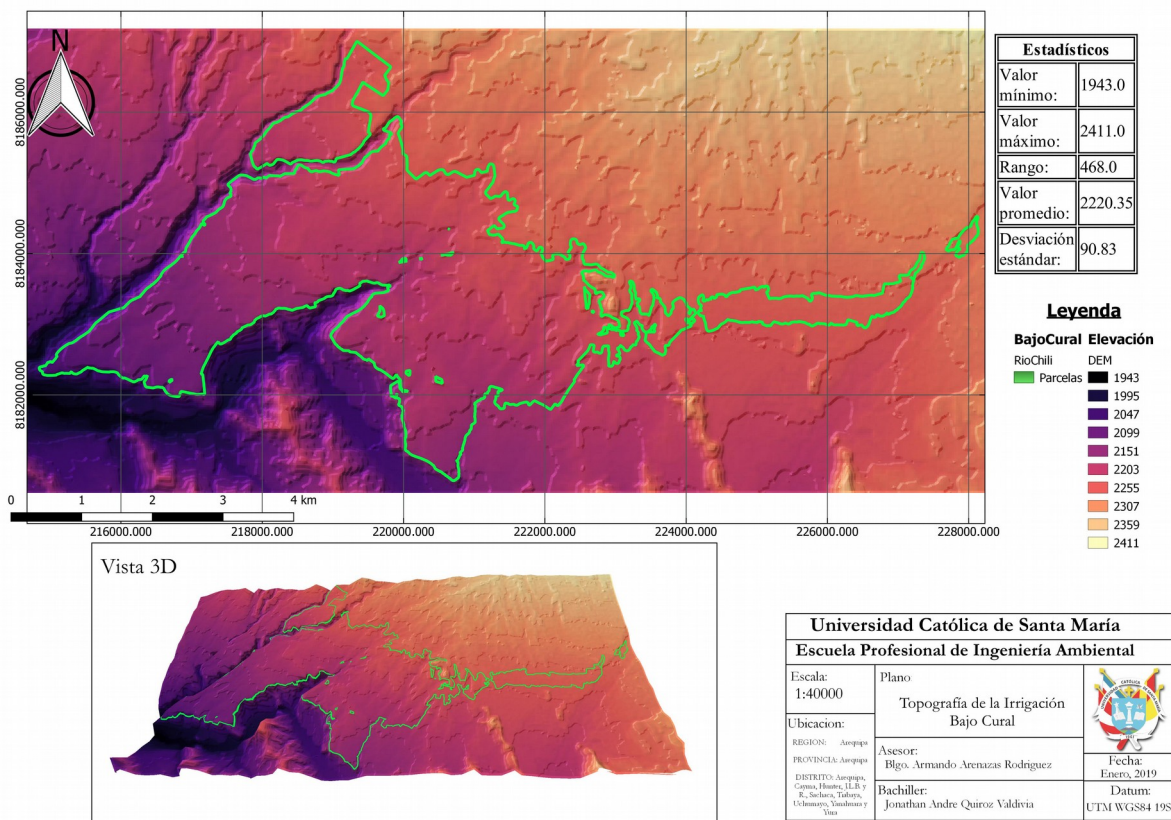


Figura 27: Topografía de la zona de estudio y vista en 3D de la irrigación "Bajo Cural"

IV.II. Modelos de requerimiento hídrico de cultivos

IV.II.I. Evapotranspiración de referencia diaria y horaria

El procesamiento de la evapotranspiración de referencia diaria se puede visualizar en la hoja de Excel del Anexo 13, pág. 184, los valores mensuales de evapotranspiración de referencia diarios como promedios mensuales se visualizan en la Figura 28, en la cual se puede observar que el valor mínimo corresponde al mes de febrero del 2018 con un valor de 3.54 mm/día y el

valor máximo se encuentra en el mes de agosto del 207 con un valor equivalente a 5.39 mm/día

Evapotranspiración de referencia diaria para la estación Huasacache

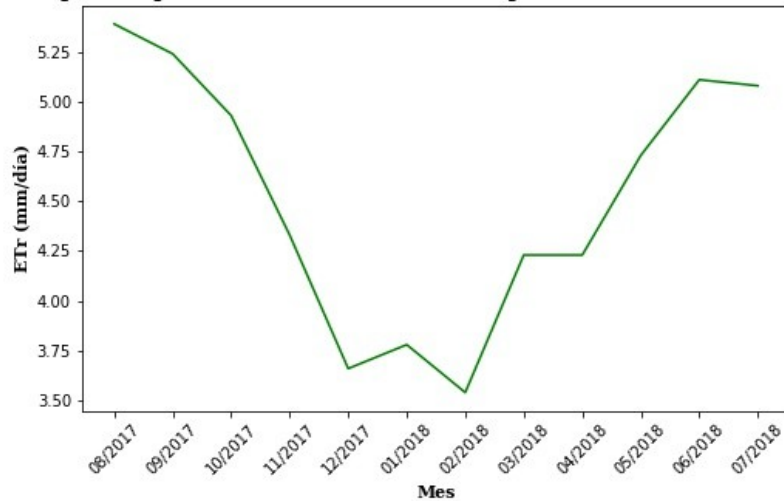


Figura 28: Evapotranspiración de referencia diaria para la estación Huasacache en el tiempo de estudio

La evapotranspiración de referencia horaria se puede visualizar en el Figura 29, en la cual se detalla la distribución de la evapotranspiración promedio horaria mensual para la estación Husacache, se registra un valor mínimo de 0.83 mm/hora para las fechas de diciembre del 2017 y enero del 2018, y un valor máximo equivalente a 1.04 mm/hora para agosto del 2017.

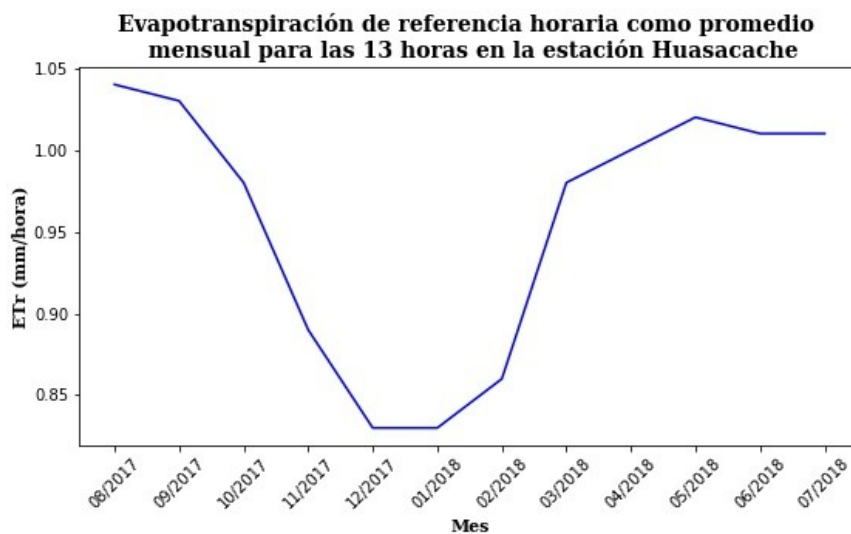


Figura 29: Evapotranspiración de referencia horaria como promedio mensual para las 13 horas en la estación Huasacache en el tiempo de estudio

Las tendencias de evapotranspiración para la evapotranspiración de referencia diaria de la Figura 28, y la evapotranspiración de referencia horaria de la Figura 29 está influenciada por factores ambientales y biológicos, entre ellos los factores claves influyentes son la demanda de agua atmosférica, la humedad y la velocidad de viento (Huizhi & Jianwu, 2012), esto puede ser contrastado con la región de Arequipa ya que la época de lluvias coincide con los valores más bajos de evapotranspiración, y esto puede ser reflejado en los valores de precipitación para la estación Huasacache, otros factores influyentes del descenso de la evapotranspiración en los meses de verano es el descenso de temperatura, el incremento de la humedad y el incremento de la sombra en el área (North Carolina Climate Office, s. f.).

IV.II.II. Evapotranspiración actual según SEBAL

Se obtuvieron 21 escenas provenientes del satélite Landsat 8, de las cuales se obtuvieron imágenes con un mínimo de nubosidad equivalente al 0.12% y un máximo de nubosidad equivalente a 58.01%, para todos los casos el área de estudio no es afectada por la nubosidad, el resumen de las escenas descargadas, su identificador, fecha de toma de la imagen y cobertura de nubes en porcentaje se visualiza en la Tabla 7

Tabla 7: Imágenes del satélite Landsat 8 sin nubosidad en el área de la irrigación Bajo Cural

N°	ID del producto	Fecha de la imagen (mm/dd/yyyy)	Cobertura de nubes (%)
1	LC08_L1TP_003071_20170802_20170812_01_T1	08/02/17	0.37
2	LC08_L1TP_003071_20170818_20170826_01_T1	08/18/17	23.10
3	LC08_L1TP_003071_20170903_20170916_01_T1	09/03/17	12.60
4	LC08_L1TP_003071_20170919_20170930_01_T1	09/19/17	7.68
5	LC08_L1TP_003071_20171005_20171014_01_T1	10/05/17	0.25
6	LC08_L1TP_003071_20171021_20171106_01_T1	10/21/17	12.28
7	LC08_L1TP_003071_20171106_20171121_01_T1	11/06/17	3.34
8	LC08_L1TP_003071_20171122_20171206_01_T1	11/22/17	1.84
9	LC08_L1TP_003071_20171208_20171223_01_T1	12/08/17	20.00
10	LC08_L1TP_003071_20171224_20180103_01_T1	12/24/17	15.99
11	LC08_L1TP_003071_20180109_20180119_01_T1	01/09/18	58.01
12	LC08_L1TP_003071_20180125_20180206_01_T1	01/25/18	20.91
13	LC08_L1TP_003071_20180314_20180320_01_T1	03/14/18	31.74
14	LC08_L1TP_003071_20180330_20180405_01_T1	03/30/18	9.15
15	LC08_L1TP_003071_20180415_20180501_01_T1	04/15/18	0.12
16	LC08_L1TP_003071_20180501_20180516_01_T1	05/01/18	15.01
17	LC08_L1TP_003071_20180517_20180604_01_T1	05/17/18	0.18
18	LC08_L1TP_003071_20180602_20180615_01_T1	06/02/18	0.36
19	LC08_L1TP_003071_20180618_20180703_01_T1	06/18/18	2.52
20	LC08_L1TP_003071_20180704_20180717_01_T1	07/04/18	1.57
21	LC08_L1TP_003071_20180805_20180814_01_T1	08/05/18	1.36

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del procesamiento se obtienen imágenes de evapotranspiración procesadas para nuestra área de estudio en función de las fechas indicadas previamente en mm/día, las Figuras 30 a 36 describen la distribución espacial de la evapotranspiración calculada con el método SEBAL, estas imágenes representan la intensidad de la evapotranspiración, las partes de la imagen con color verde más intenso reflejan las áreas con mayor tasa de evapotranspiración y de forma contraria, las partes que presentan color amarillo representan las menores tasas de evapotranspiración pudiendo llegar a una tasa de 0 mm/día, estos valores bajos coinciden con cultivos que estén en sus primeros días de cosecha, con parcelas que están sin cosecha en el momento o parcelas abandonadas, de aquí viene la importancia de reconocer bien los pixeles calientes como pixeles que al momento de la imagen no tengan cultivos y sean parcelas secas; como SEBAL produce valores distribuidos en función del área definida inicialmente, su análisis se realizará en función de los valores extraídos relacionados con la ubicación de las parcelas encuestadas, estos valores se representan en las necesidades hídricas calculadas en las Tabla 18 y 19.

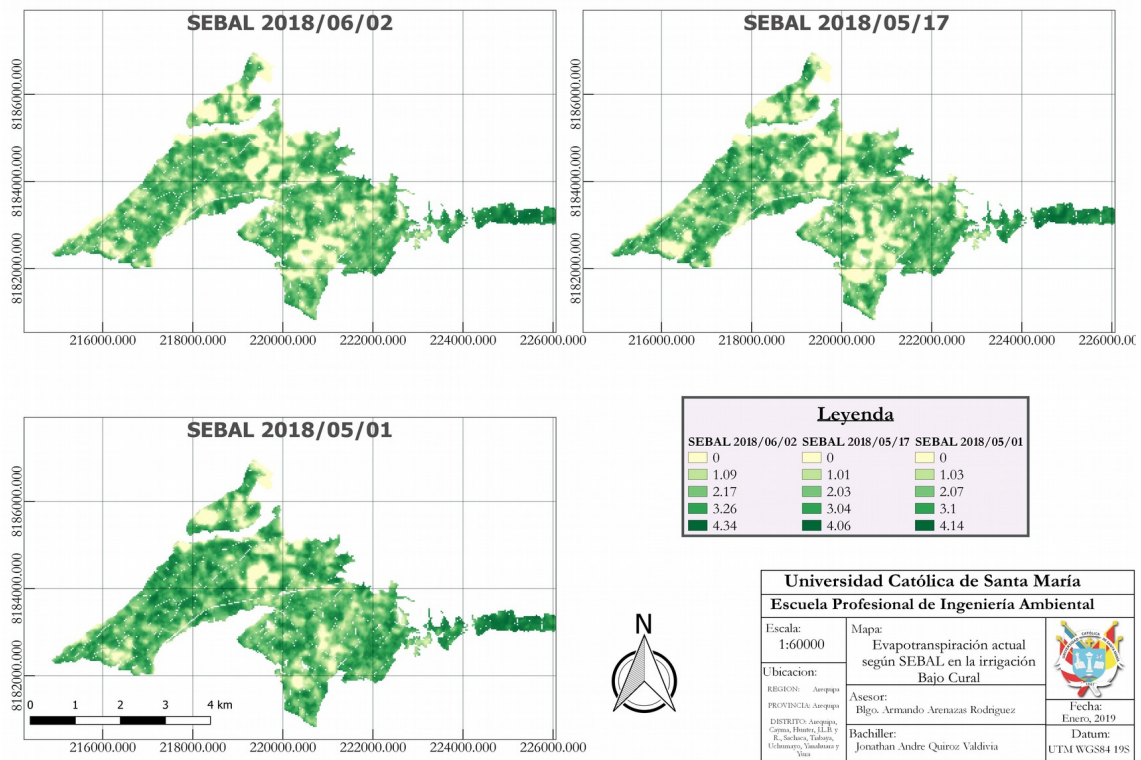


Figura 30: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/06/02, 2018/05/17 y 2018/05/01.

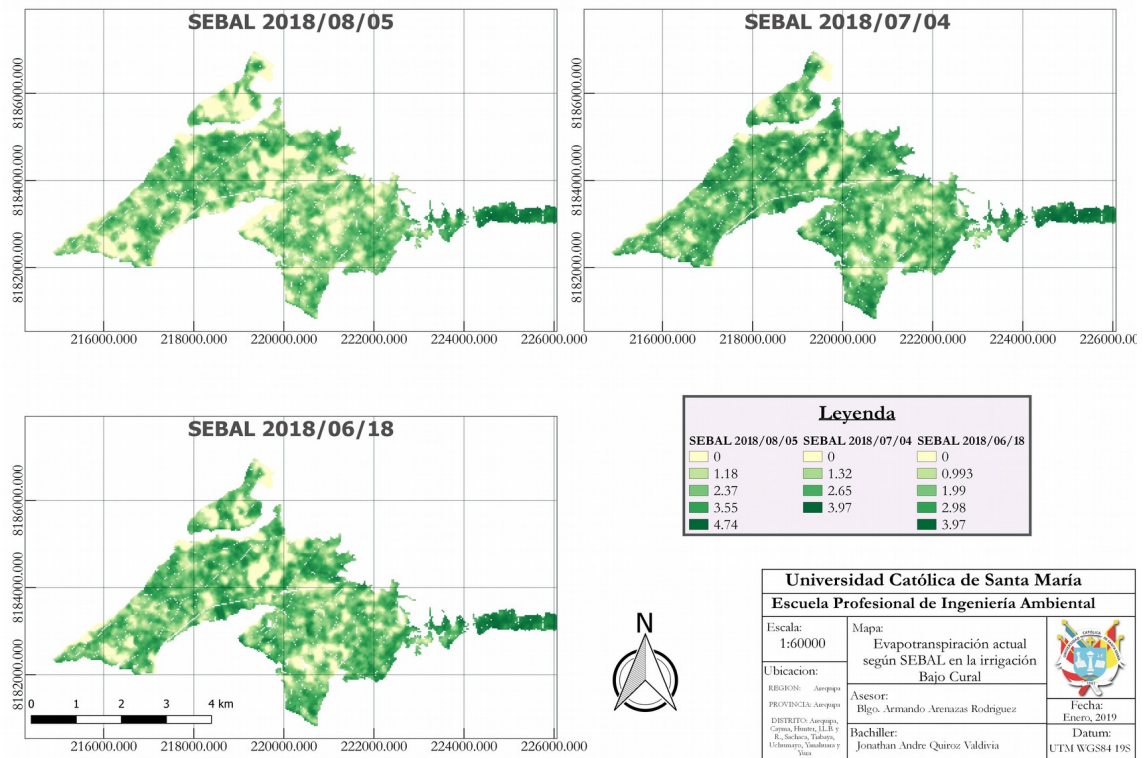


Figura 31: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/08/05, 2018/07/04 y 2018/06/18.

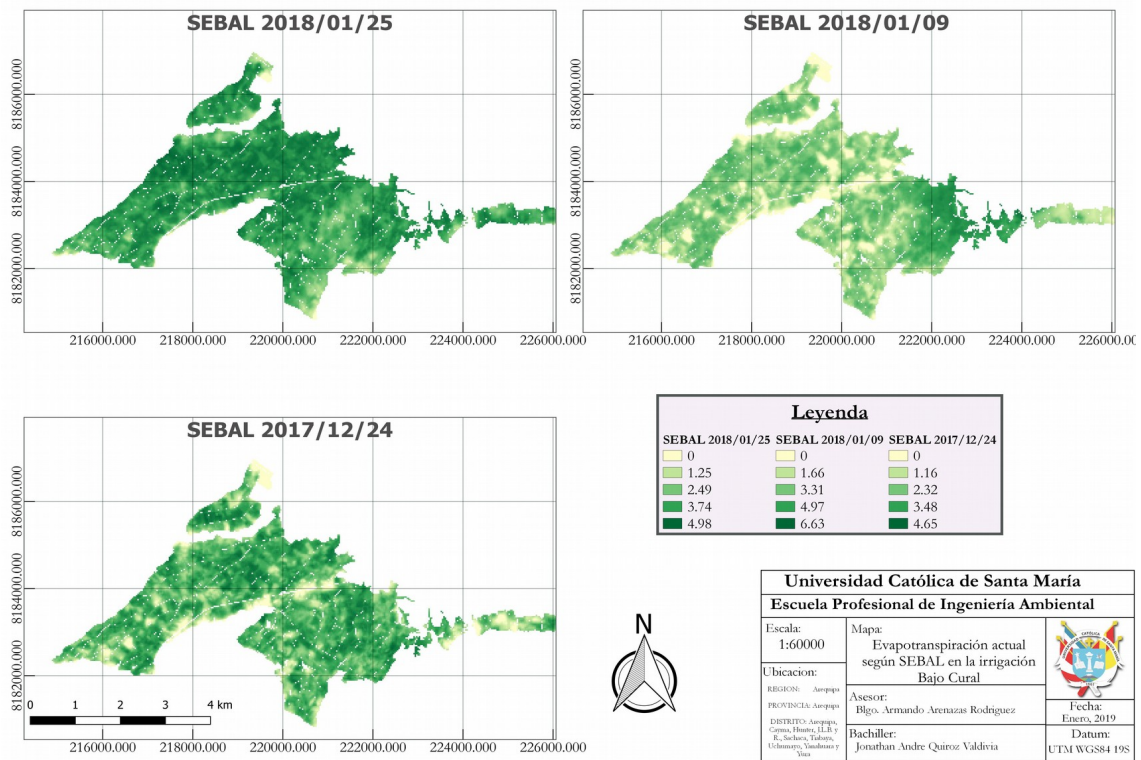


Figura 33: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2018/01/25, 2018/01/09 y 2017/12/24.

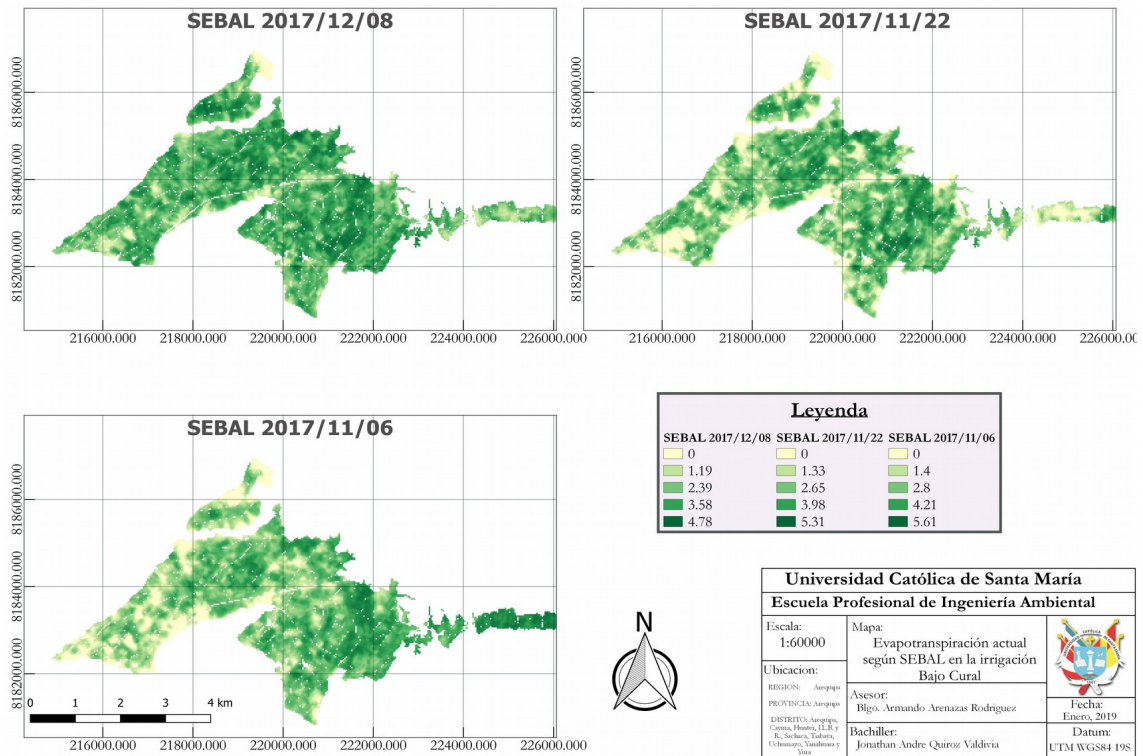


Figura 34: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/12/08, 2017/11/22 y 2017/11/06.

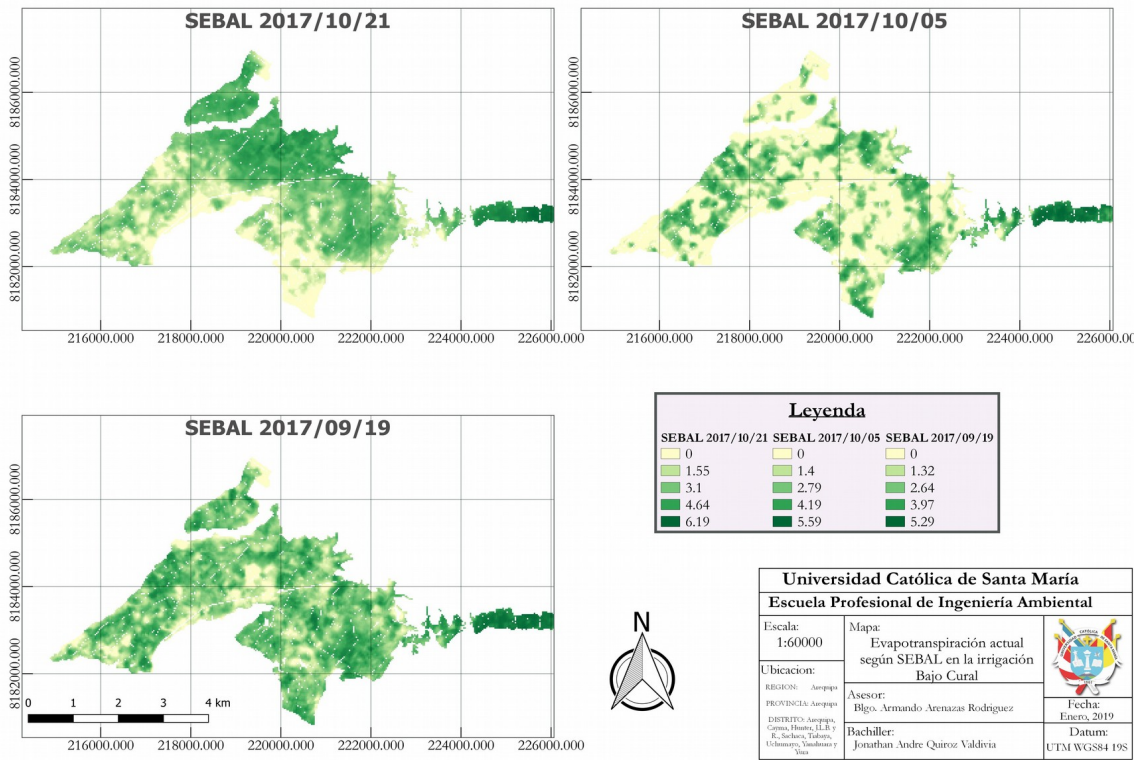


Figura 35: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/10/21, 2017/10/05 y 2017/09/19.



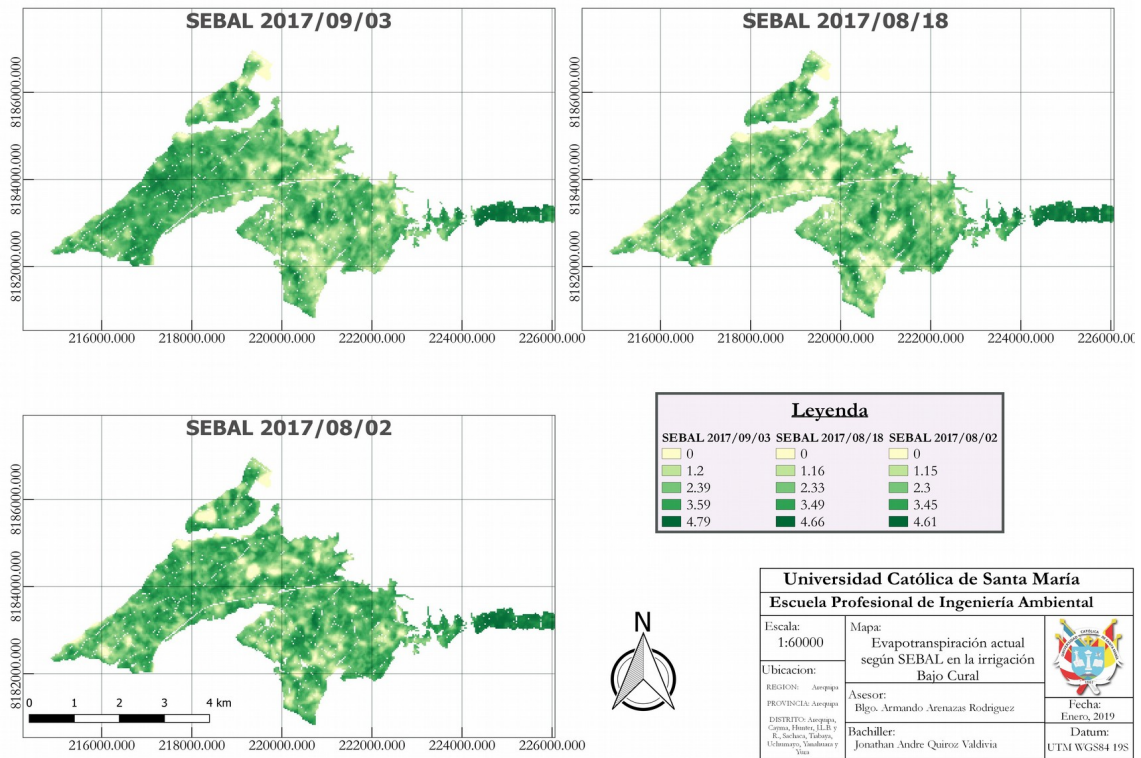


Figura 36: Imágenes evapotranspiración actual procesadas con SEBAL para las fechas 2017/09/03, 2017/08/18 y 2017/08/02.

IV.II.III. Características del suelo

El análisis de la muestra de suelo es realizada por el laboratorio “Coaquira Hnos. - Laboratorio de suelos, concreto y asfalto” (Anexos 6-7-8, pág. 168-169-170), los resultados del laboratorio se visualizan en la Tabla 8, obteniendo predominancia de arenas (86% en peso) e inadecuado para construcción (5.57% de materia orgánica)

Tabla 8: Propiedades correspondientes a la muestra de suelo de la Irrigación Bajo Cural

	Porcentaje (%)
Gravas	10.7
Arenas	86.1
Arcillas	3.2
Humedad Natural	13.44
Materia Orgánica	5.57
Limite Liquido	0%
Limite Plástico	No Presenta
Índice Plastico	No Presenta
Clasificación AASHTO	A-1-b

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del software Soil Water Characteristics (Anexo 9, pág. 171) se presentan en la Tabla 9, a partir de ello se obtienen que la muestra de suelo tiene una clasificación textura franco arenoso, un Punto de Marchitez Permanente equivalente a 7.3%vol, Capacidad de campo equivalente a 14.5%vol, los cuales están influenciados por la materia orgánica, la cual permite el aumento de la retención de agua (Bot & Benites, 2005), una saturación correspondiente al 54.5% del volumen lo que significa que la muestra de suelo estaba parcialmente húmeda, esto puede ser debido a la aplicación previa de agua en el campo y una conductividad hidráulica saturada bastante elevada.

Tabla 9: Parámetros de suelo correspondientes a la muestra de la irrigación Bajo Cural según las ecuaciones de Saxton & Rawls (2006)

Textura de suelo	Franco Arenoso	
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	7.3	% Vol
Capacidad de Campo (CC)	14.5	% Vol
Saturación	54.5	% Vol
Agua Disponible	0.07	cm/cm
Conductividad Hidráulica Saturada	145.56	mm/hr
Densidad Aparente	1.21	g/cm ³
Conductividad Hidráulica	4.18E-07	mm/hr

Fuente: Elaboración propia.

IV.II.IV. Cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos según la evapotranspiración calculada con Penman-Monteith y SEBAL

De las 2 campañas de encuestas realizadas se obtiene un total de 12 agricultores encuestados cubriendo la mayoría de los laterales del Bajo Cural, entre ellos se tiene un total de 22 lotes diferentes y cada uno de estos lotes se divide en tabladas dependiendo del criterio de siembra del agricultor, obteniéndose así 67 tabladas diferentes, teniendo en consideración que algunos lotes no tienen divisiones por tabladas, la mayoría de las tabladas se encontraron en el lateral 7 debido a su gran extensión y a los roles de riego implementados.

Se identificó en la zona la presencia de los métodos de riego por gravedad y goteo, teniendo mayor frecuencia el riego por gravedad, el tiempo de riego e intervalo de riego de cada agricultor es definido en función del lateral en que se encuentre, en la Tabla 10 se resumen los agricultores encuestados, los lotes, el tipo de riego, el tiempo de riego y los cultivos, para los cuales las

horas de riego son asignadas en función de los laterales y en algunos casos en función del área, los tiempos de riego son asignados por lote y el tipo de riego depende de cada agricultor.

Tabla 10: Resumen de los agricultores encuestados, los lotes, el tipo de riego, el tiempo e intervalo de riego y los cultivos encontrados

Agricultor	Lote	Tipo Riego	Tiempo Riego (horas / días)	Cultivos
Manuel Otazu	55	Gravedad	3:20 / 8.5	Cebolla, papa
Desconocido	62	Gravedad	3:00 / 6.5	Cebolla, maíz morado
Emilio	245	Gravedad	2:30 / 8.5	Alfalfa
Alex Manrique	147	Gravedad	2:30 / 8.5	Alberja, cebolla
Elmer Salas	183	Gravedad	2:30 / 8.5	Avena, cebolla
Pablo Anco	269	Gravedad y Goteo	3:45 / 8.5	Alberja, cebolla
Felix Valdivia	553, 552, 558	Gravedad	2:28 / 8.5	Alberja, cebolla, palto, papa
Carol Rodriguez	537	Gravedad	2:28 / 8.5	Alberja, cebolla, haba, maíz forrajero
Gustavo Quispe	449, 446	Goteo	2:26 / 8.5	Alfalfa, ajo, cebolla, papa
Jose Tejada	500	Gravedad	2:26 / 8.5	Alberja, cebada, cebolla, maíz forrajero, palto
Jose Paredes	540, 541, 542, 548, 549	Gravedad	2:26 / 8.5	Alberja, alfalfa, cebolla, zanahoria
Francisco Roque	616, 620, 623	Gravedad y Goteo	4:00/ 8.5	Alberja, cebolla, papa

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11 se muestra la comparación entre los cultivos establecidos para la delimitación de bloque de riego del Bajo Cural y los cultivos encontrados mediante encuestas, se puede visualizar que no se abarcaron el total de los cultivos, dejando de lado los cultivos de apio, brócoli y zapallo; según los

testimonios de los agricultores el apio es un vegetal que no se cultiva por la alta demanda de agua que requiere y esto puede ser contrastado en los volúmenes calculados en la delimitación de Bloque de Riego para la irrigación Bajo Cural (Autoridad Local del Agua Chili, 2015), el zapallo no es común porque ocupa demasiado espacio y el brócoli es sembrado en pequeñas cantidades, para el caso del brócoli no se pudo encontrar una parcela con el cultivo para el tiempo de estudio.

Tabla 11: Cultivos encontrados mediante encuestas en el Bajo Cural en función de los Cultivos Objetivo según el estudio de delimitación de bloque de riego para la irrigación Bajo Cural

Cultivos Objetivo	Cultivos Encontrados
Ajo	X
Alberja	X
Alfalfa	X
Apio	
Avena	X
Brocoli	
Cebada	X
Cebolla seca	X
Maiz amilaceo	X
Palto	X
Papa	X
Zanahoria	X
Zapallo	

Fuente: Elaboración propia.

En base a las encuestas (Anexo 10., pág 172) se determina que algunos cultivos como la alberja, cebolla, maíz y papa tienen variados tiempos de siembra y cosecha, esto se puede visualizar en la Tabla 12:

Tabla 12: Meses que se siembra cada cultivo identificado mediante encuestas realizadas en la Irrigación Bajo Cural.

CULTIVOS	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Ajo												
Alberja												
Alfalfa												
Avena												
Cebada												
Cebolla seca												
Maiz amilaceo												
Palto												
Papa												
Zanahoria												

Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de cultivo en función de la delimitación de bloque de riego para el Bajo Cural se visualizan en la Tabla 13:

Tabla 13: Coeficientes de cultivo (kc) de los cultivos identificados para la irrigación Bajo Cural

	Kc _{inicial}	Kc _{medio}	Kc _{final}
Ajo	0.35	0.9	0.65
Alberja	0.3	0.75	0.55
Alfalfa	0.35	0.86	0.86
Avena	0.35	0.8	0.4
Cebada	0.35	0.8	0.35
Cebolla seca	0.35	0.75	0.4
Maíz amiláceo	0.3	0.6	0.5
Palto	0.6	0.85	0.65
Papa	0.3	0.85	0.65
Zanahoria	0.3	0.9	0.65

Fuente: Autoridad Local del Agua Chili, (2015)

La cantidad de días para cada cultivo según los periodos vegetativos se visualiza en la Tabla 14, estos periodos están en función de la delimitación de bloque de riego.

Tabla 14: Periodos de crecimiento de los cultivos identificados para la irrigación Bajo Cural en días según

	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Total
Ajo	25	40	70	45	180
Alberja	15	25	35	15	90
Alfalfa	92	91	91	91	365
Avena	15	30	45	30	120
Cebada	15	30	45	30	120
Cebolla seca	25	35	70	50	180
Maíz amiláceo	46	46	65	23	180
Palto	90	90	95	90	365
Papa	36	44	63	37	180
Zanahoria	42	50	58	30	180

Fuente: Autoridad Local del Agua Chili (2015)

Los cultivos que presentaron diferencias según lo encuestado son los cultivos de Ajo, Maíz Amilaceo, Papa y Zanahoria, los resultados de las interpolaciones realizadas para estos cultivos se visualiza en la Tabla 15:

Tabla 15: Total de días de cultivos según informe de delimitación de bloque de riego, según encuestas a agricultores, factor de conversión y etapas modificadas según el factor de conversión

	Días Bloque de Riego	Días Encuesta	Factor	Inicial	Desarrollo	Medio	Final
Ajo	180	120	0.67	17	27	47	30
Maiz Amiláceo	180	120	0.67	31	31	43	15
Papa	180	120	0.67	24	29	42	25
Zanahoria	180	120	0.67	28	33	39	20

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16 se presentan los valores de profundidad radicular para un tiempo inicial, de desarrollo, medio y final, pudiéndose identificar que el cultivo con menor profundidad radicular final es el cultivo de cebolla seca el cual equivale a 0.15 metros de profundidad.

Tabla 16: Profundidad radicular para los cultivos de la irrigación Bajo Cural según etapas

	Inicial (m)	Desarrollo, Medio y Final (m)
Ajo	0.10	0.20
Alberja	0.15	0.60
Alfalfa	0.10	0.50
Avena	0.20	0.50
Cebada	0.20	0.60
Cebolla seca	0.05	0.15
Maíz amiláceo	0.20	0.50
Palto	0.30	1.00
Papa	0.15	0.60
Zanahoria	0.05	0.20

Fuente: Autoridad Local del Agua Chili (2015)

En la Tabla 17 se presentan los valores de agotamiento crítico inicial, medio y final, estos valores varían en función de cada cultivo

Tabla 17: Fracción de agotamiento crítico para los cultivos de la zona de la irrigación Bajo Cural según etapas

	Inicial	Medio	Final
Ajo	0.40	0.40	0.45
Alberja	0.50	0.60	0.60
Alfalfa	0.55	0.55	0.55
Avena	0.55	0.55	0.55
Cebada	0.60	0.60	0.90
Cebolla seca	0.35	0.33	0.36
Maíz amiláceo	0.50	0.50	0.30
Palto	0.70	0.70	0.70
Papa	0.25	0.30	0.50
Zanahoria	0.30	0.45	0.50

Fuente: Autoridad Local del Agua Chili (2015)

Para el análisis de las necesidades hídricas no se toma en consideración la precipitación efectiva resultante, ya que esta equivale a 0 mm/mes para todos los meses entre agosto del 2017 y julio del 2018.

En la Tabla 18 se resume los resultados de las necesidades hídricas para cada cultivo de estudio según Penman-Monteith, pudiendo observar que los cultivos que demandan mayor cantidad de agua es el cultivo de palto seguido por el de alfalfa, esto se debe a que la alfalfa es un cultivo que tiene un periodo vegetativo superior a un año y el cultivo de palto es indefinido y el cultivo que menos agua requiere es el ajo, seguido de la alverja y el maíz amiláceo.

Tabla 18: Volúmenes de agua requeridos por mes, total y total por mes para cada cultivo usando evapotranspiración de referencia y coeficientes de cultivo considerada por el método Penman-Monteith

CULTIVOS	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	TOTAL
Ajo								5.95	19.85	27.90	25.73	9.10	88.53
Alberja1							14.85	73.66	95.15	45.68			229.34
Alberja3									20.37	86.55	114.67	41.61	263.21
Alberja4										55.62	111.57	102.38	269.56
Alberja2								21.82	75.89	109.69	38.19		245.59
Alberja5	27.79	94.11	114.26	32.39									268.55
Alfalfa	58.50	55.07	53.50	56.76	68.94	91.53	85.13	112.86	109.10	126.21	131.72	135.45	1,084.78
Avena								25.38	77.51	117.41	110.89	28.86	360.05
Cebada	32.32	96.13	122.30	92.83	18.99								362.56
Cebolla1	59.79	93.66	114.65	97.44	78.00	50.10							493.64
Cebolla2	32.08	70.23	110.26	97.44	83.92	67.36	15.26						476.53
Maiz amilaceo2									38.06	65.33	91.90	84.34	279.63
Maiz amilaceo1								21.59	43.62	83.24	91.70	32.72	272.87
Palto	100.28	94.40	91.76	84.27	83.18	95.89	84.14	111.55	107.83	120.17	115.05	107.63	1,196.14
Papa2								21.59	60.19	123.40	126.47	42.31	373.97
Papa3	27.50	74.65	128.54	107.28	30.47								368.43
Papa5		25.17	71.67	109.20	93.75	31.47							331.27
Papa4		49.29	106.28	110.43	80.68								346.68
Papa1							30.37	87.46	107.83	112.44			338.10
Zanahoria							14.85	51.15	104.95	130.84	52.27		354.05
TOTAL	306.16	508.02	625.02	474.11	348.79	286.24	244.60	489.61	665.85	838.86	768.70	510.06	

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de las tabladas se retiraron los lotes 62, 245 y 540, estos lotes se quitaron del estudio debido a que no proporcionaban una información completa de las tabladas y debido a que las distribuciones señaladas eran incorrectas con respecto a la geometría proporcionada por el catastro agrario, por lo que se dispone del uso de 61 tabladas en total. En la Figura 37 se visualizan las parcelas/tabladas que se encuestaron con respecto a las parcelas de la irrigación.

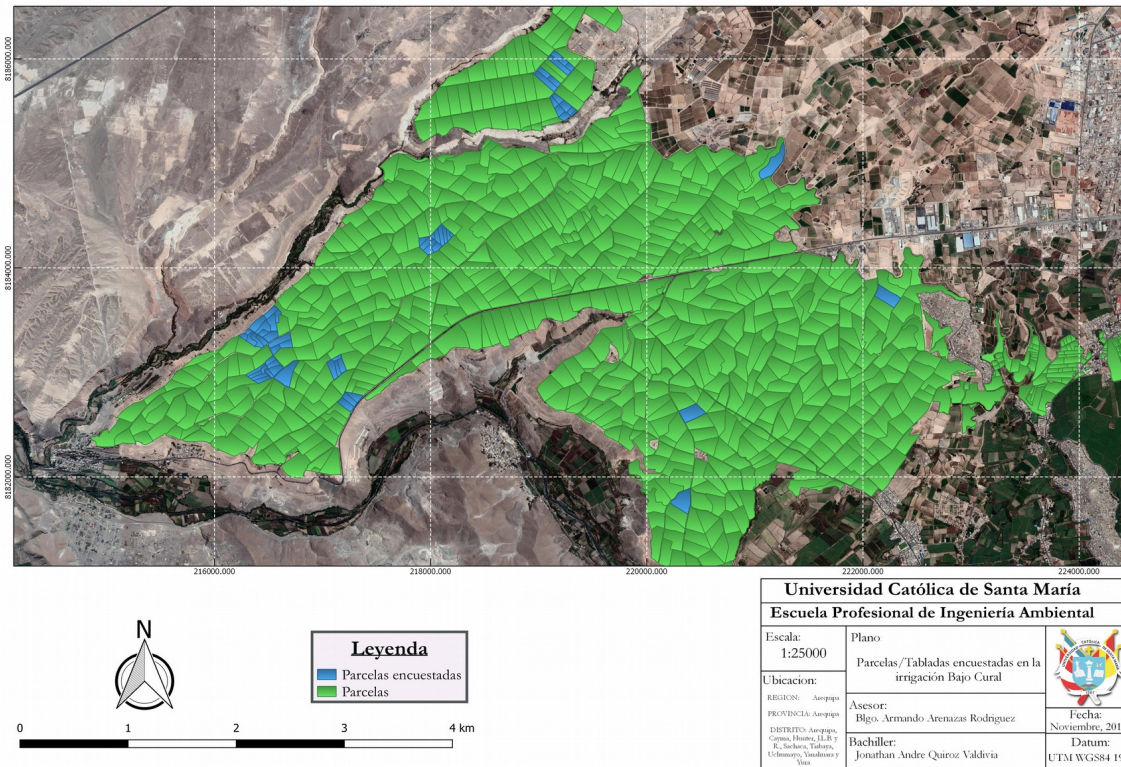


Figura 37: Parcelas/Tabladas encuestadas en la irrigación Bajo Cural

El cálculo de las necesidades hídricas para cada cultivo según los valores extraídos de las tabladas encuestadas (Figura 37), se visualiza en la Tabla 19, pudiendo observar que la mayor cantidad de agua demandada, al igual que los cálculos según Penman-Monteith provienen de los cultivos de Palto y Alfalfa, seguido del cultivo de cebolla y el cultivo de Ajo.

Tabla 19: Volúmenes de agua requeridos por mes, total y total por mes para cada cultivo usando evapotranspiración actual considerada por el método SEBAL.

CULTIVOS	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	TOTAL
Ajo								45.92	92.26	105.97	87.68	27.94	359.77
Alberja1							36.70	94.40	65.96	19.96			217.03
Alberja3									24.92	69.07	92.91	33.60	220.50
Alberja4										52.46	58.45	64.71	175.63
Alberja2								40.91	69.97	96.92	37.97		245.77
Alberja5	56.07	123.07	139.95	38.65									357.74
Alfalfa	115.61	99.52	83.50	82.12	98.98	128.34	114.40	93.92	79.88	107.18	87.02	80.31	1,170.78
Avena								26.18	47.35	51.68	51.32	15.44	191.97
Cebada	42.41	100.84	120.04	56.30	23.67								343.26
Cebolla1	86.41	87.65	86.37	76.73	106.26	89.07							532.50
Cebolla2	40.50	89.19	102.68	99.11	108.31	110.02	34.72						584.54
Maiz amiláceo2									27.78	66.98	91.40	93.45	279.61
Maiz amiláceo1								8.50	15.00	15.50	14.92	4.48	58.40
Palto	89.59	106.48	110.33	79.21	87.28	108.11	92.19	69.95	48.51	78.78	74.21	65.61	1,010.25
Papa2								47.75	67.64	86.12	110.89	40.93	353.34
Papa3	4.25	7.69	8.60	9.63	5.47								35.65
Papa5		4.00	7.94	8.31	9.92	5.47							35.65
Papa4		7.51	8.23	8.61	11.30								35.65
Papa1							7.01	8.19	8.57	11.89			35.65
Zanahoria							4.20	9.62	11.03	13.38	6.77		45.00
TOTAL	394.33	526.79	565.11	365.02	329.55	351.95	289.22	396.25	444.42	607.01	602.21	388.40	

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 20 de la pág. 199-218, se representan los gráficos de la programación de riego para los cultivos según el cálculo de la evapotranspiración mediante Penman-Monteith y SEBAL, en los cuales se representa la Capacidad de Campo, el agua fácilmente aprovechable, el agua disponible total y el agotamiento el cual representa los descensos de la lámina de riego por evapotranspiración y los ascensos aplicados mediante irrigación. Comparado con otros métodos como METRIC, SEBS y SSEBop, todos resultan ser útiles para los cálculos, la única limitancia entre ellos es la necesidad de información (Gotardo et al., 2016).

Los cultivos de papa 1-3-4-5, zanahoria y maíz amiláceo 1 procedieron a eliminarse del procedimiento debido a que resultan volúmenes de agua muy bajos. En la Tabla 20 y en la Figura 38 se representan los promedios totales

de los cultivos analizados y filtrados según cada método y adicionando los volúmenes calculados mediante la delimitación de bloque de riego del Bajo Cural, pudiendo observar que dependiendo de cada consideración varían los volúmenes de agua en cada cultivo y además se debe tener en consideración que para la delimitación del bloque de riego del Bajo Cural consideraron la estación meteorológica la Pampilla ubicada en el centro de la ciudad, la cual otorga datos meteorológicos influenciados por factores urbanos como estructuras superficiales, edificios y humo (Bulut, Toy, Irmak, Yilmaz, & Yilmaz, 2008), a diferencia de los cálculos realizados con datos meteorológicos de la estación Huasacache la cual se encuentra en una zona rural. La cantidad de agua requerida va a depender de las condiciones climáticas, del suelo y la biología de la planta (Pereira et al., 1998). Zhang et al., (2018) menciona que la evapotranspiración está dominada principalmente por la radiación neta con un coeficiente estandarizado total igual a 0.78, esto significa que el 78% de todo el procedimiento está dominado por la radiación neta, por lo que habría que contar con registros de radiación solar para los cálculos de evapotranspiración ya que las usadas por la FAO no han sido desarrollada con base a lo que sucede en Perú, y en el Perú la radiación solar es potente, registrando para la ciudad de Arequipa valores altos de irradiación correspondientes a 5.31 kWh/m² según MINEM, (2001). Los requerimientos hídricos calculados mediante la evapotranspiración de cultivo basada en Penman-Monteith y la evapotranspiración actual calculada mediante SEBAL no tienen diferencia significativa, lo cual valida el algoritmo (Silva et al., 2018), la diferencia en estos cálculos vendría a ser provista por los coeficientes de agotamiento crítico, la altura de los cultivos y los coeficientes de cultivo usados en base a lo establecido en la delimitación de bloque de riego del Bajo Cural, los cuales no cuentan con referencias bibliográficas, si no, son aplicados directamente en función del criterio del autor, lo cual limita la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith en los cuales hay una ausencia de

información observada y esto pasa en variedad de regiones semi áridas como Arequipa (Najmaddin, Whelan, & Balzter, 2017), por lo que es recomendado usar la teledetección debido a que puede calcular cada valor necesario en función de las bandas espectrales, así por ejemplo el cálculo del albedo superficial, la temperatura superficial y el índice de área foliar (Rahimi, Gholami Sefidkouhi, Raeini-Sarjaz, & Valipour, 2015); los cuales usando el método de Penman-Monteith sería provisto como un valor estándar en función de un cultivo de referencia como el pasto o la alfalfa.

Tabla 20: Requerimientos hídricos totales promedios para cada tipo de cultivo según la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith, SEBAL y los requerimientos según la licencia de la irrigación Bajo Cural.

CULTIVOS	Requerimientos Penman-Monteith	Requerimientos SEBAL	Requerimientos Licencia
Ajo	88.53	359.77	506.30
Alberja	255.25	243.33	180.55
Alfalfa	1,084.78	1,170.78	940.40
Avena	360.05	191.97	364.40
Cebada	362.56	343.26	287.90
Cebolla	485.09	558.52	481.10
Maiz amilaceo	279.63	279.61	461.90
Palto	1,196.14	1,010.25	986.80
Papa	373.97	353.34	530.30
TOTAL	4,485.99	4,510.83	4,739.65

Fuente: Elaboración propia.

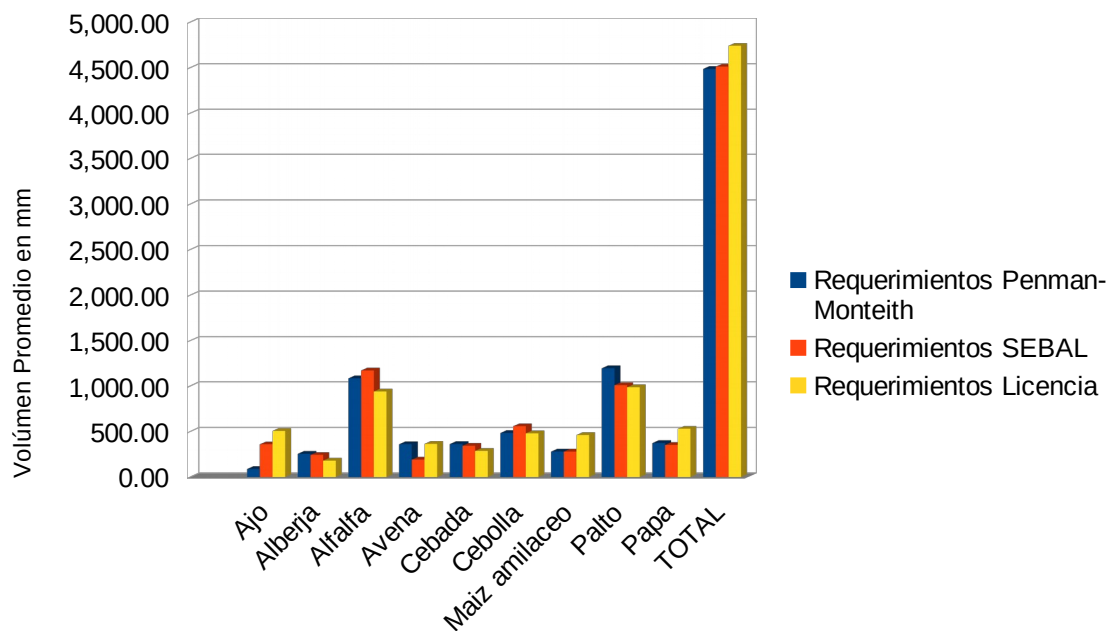


Figura 38: Comparación de los requerimientos hídricos totales promedio para cada cultivo según la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith y SEBAL

IV.III. Eficiencia sistema hidráulico

Los canales presentes en la zona de estudio están descritos en el informe otorgado por la Junta de Usuarios del Chili Regulado, en la Tabla 21 se muestra la leyenda empleada para la clasificación de los materiales de los canales descritos en la Tabla 22:

Tabla 21: Tipos, Material y estado de infraestructura hidráulica según la Junta de Usuarios de Chili Regulado

Tipo :	(R) Revestido	(T) Tierra	Otros (O)
Material :	(C) Concreto	(M) mampostería	(O)Otros
Estado :	B (bueno)	R (regular)	M (malo)
Tipo 1 :	(P)Parshall	(SC) Sin Cuell	(R) RBC, LG (O) otros
Material :	Madera	Fierro	Otros

Fuente: Autoridad Local del Agua Chili, (2015)

Tabla 22: Descripción de los canales presentes en los laterales 1 al 8 en la irrigación Bajo Cural

Nombre del Lateral	Ubicación	Características del Canal								Tomas		
	Progresiva (Km.)	Tipo	Material	Estado	Caudal (m3/seg)	Características		Longitud de Canal (Km)		Compuerta		
					Operación	b(m)	H(m)	Revestido	Sin Revestir	Ancho/Alto	Material	Estado
Lateral 1	7+445	T	O	R	0.090	0.60	0.80	1.42	3.244	0.40/1.20	Fe	R
Lateral 1 Chico	8+072	T	O	R	0.090	0.40	0.70	0.44	0.435	0.50/1.10	Fe	R
Lateral 2	8+438	T	O	R	0.090	0.50	0.60	2.18	2.180	0.50/0.90	Fe	R
Lateral 2 Chico	9+303	T	O	R	0.090	0.70	0.60		1.084	0.50/1.10	Fe	R
Lateral 3	9+501	T	O	R	0.180	0.70	0.80	4.02	4.018	0.70/0.80	Fe	R
Lateral 4	9+773	T	O	R	0.900	0.50	0.90	1.61	1.611	0.50/0.90	Fe	R
Lateral 5	12+117	T	O	R	0.900	0.70	0.60	1.66	1.656	0.60/0.90	Fe	R
Cornejo II	12+675	T	O	R	0.900	0.40	0.50	0.31	0.836	0.20/0.70	Fe	R
Lateral 6	13+008	T	O	R	0.900	0.60	6.00	1.37	1.367	0.50/1.30	Fe	R
Lateral 7	13+208	T	O	R	0.180	1.90	0.80	4.90	4.899	1.05/1.10	Fe	R
Lateral 8	13+208	T	O	R	0.090	1.50	1.60	0.14	2.843	1.50/1.60	Fe	R

Fuente: Elaboración propia,

Se puede visualizar que el total de los laterales son de tierra y se encuentran en estado regular. Los aforos se realizaron a partir de la toma del lateral 1

La ubicación de los puntos de muestreo puede ser visualizada en la Figura 39:

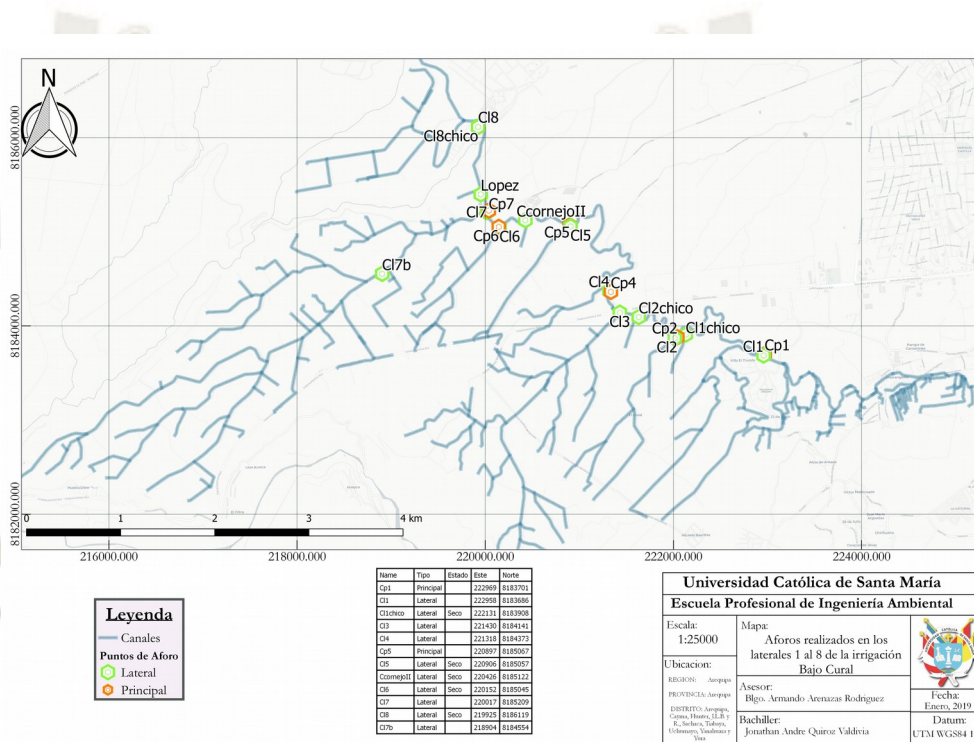


Figura 39: Ubicación de los aforos realizados en los canales de los laterales 1 al 8 en la irrigación Bajo Cural

La eficiencia de conducción se procede a calcular en función del balance realizado para el caudal del canal principal y el caudal que es distribuido a los laterales, la ubicación espacial de los puntos aforados se encuentra en la Tabla 23.

Tabla 23: Coordenadas de los puntos de aforo realizados en los canales de la irrigación Bajo Cural

Nombre	Tipo	Coordenadas WGS 84 19S	
		Este	Norte
C.Cornejo	Lateral	220426	8185122
Cl1	Lateral	222958	8183686
Cl1chico	Lateral	222131	8183908
Cl2	Lateral	222014	8183870
Cl2chico	Lateral	221631	8184094
Cl3	Lateral	221430	8184141
Cl4	Lateral	221318	8184373
Cl5	Lateral	220906	8185057
Cl6	Lateral	220152	8185045
Cl7	Lateral	220017	8185209
Cl7b	Lateral	218904	8184554
Cl8	Lateral	219925	8186119
Cl8chico	Lateral	219924	8186113
Cp1	Principal	222969	8183701
Cp2	Principal	222042	8183880
Cp4	Principal	221334	8184362
Cp5	Principal	220897	8185067
Cp6	Principal	220143	8185052
Cp7	Principal	220038	8185225
Lopez	Lateral	219952	8185398

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de aforo del canal principal se clasifican según el aforo, si es antes o después de la intersección con el canal lateral influente, en la Tabla 24 se describen los aforos realizados donde 1er orden es antes del canal lateral de influencia y 2do orden es después del canal lateral de influencia, además se visualiza que el caudal administrado después del lateral 1 equivale a 1.837 m³/s y que al lateral 8 llegan 0.112 m³/s.

Tabla 24: Puntos de muestreo en el canal principal según el canal lateral de influencia, ordenes de toma de muestra y caudales aforados en el canal principal del Bajo Cural.

Canal Principal	Orden	Caudal aforado (m ³ /s)
1	2do	1.837
2	2do	1.538
4	1ero	1.231
5	1ero	1.01
6	2do	0.987
7	1ero	0.925
8	-	0.112

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los aforos realizados en los laterales se visualizan en la Tabla 25 en la cual se presenta el nombre del lateral, el estado del canal activo o inactivo y el caudal aforado, se pueden diferenciar los estados activos o inactivos por consecuencia del rol de riego, los inactivos se encontraban con la compuerta cerrada, y el lateral que más agua demanda al sistema es el Lateral 7 con 0.773 m³/s.

Tabla 25: Caudales aforados en los canales principal y lateral del 1 al 8

Lateral	Estado	Caudal aforado (m ³ /s)
1	Activo	0.265
1 chico	Inactivo	-
2	Activo	0.292
2 chico	Inactivo	-
3	Activo	0.298
4	Activo	0.208
5	Inactivo	-
C. Cornejo	Inactivo	-
6	Inactivo	-
7	Activo	0.773
Lopez	Inactivo	-
8	Inactivo	-
8 chico	Activo	0.112

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de conducción es calculada en función de los aforos en los canales laterales, siendo el caudal final el caudal del lateral 8 chico, y el caudal inicial la sumatoria del caudal del lateral 1 y el caudal del canal principal 1, teniendo como resultado una eficiencia de conducción equivalente a 92.67%

La eficiencia de distribución calculada para en función del canal 7 en base a los aforos realizados, teniendo un caudal inicial equivalente a $0.773 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal en el punto B a 1404 metros equivalente a $0.742 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando en una de distribución equivalente a 95.98%, esta pudo ser menor, pero al ser un lateral muy grande con muchas parcelas usando agua en el mismo momento se dificultó calcular la eficiencia total de distribución.

La eficiencia de aplicación toma el valor para riego tradicional o tendido siendo equivalente este a una Eficiencia de Aplicación de 30%.

Por consiguiente la eficiencia total del sistema equivale a 26.68%, estos porcentajes son muy bajos por la influencia de la eficiencia de aplicación cuyo valor es 30%, esto sería diferente si se aplicará un sistema de riego por aspersión o goteo en los cuales las eficiencias de aplicación estarían entre 50 y 95% respectivamente (Nuñez & Hurtado, 2015), basado en lo descrito las pérdidas por conducción están influenciadas directamente por el deficiente mantenimiento de las compuertas las cuales filtran agua (Anexo 16, pág. 190), los robos de agua que puedan ocasionarse al momento, el control en los volúmenes suministrados al sistema y por último la gran extensión de la irrigación, la cual tiene el canal principal en buen estado pero el estado de los canales de distribución es deficiente o pobre, siendo en su mayoría de sillar la cual es una roca muy permeable 10^{-2} y 10^2 m/día (Opazo González, 2009). El valor de eficiencia de riego puede ser contrastado con la eficiencia de riego usada para la delimitación de bloque de riego del Bajo Cural, para la

cual se aplicó una eficiencia correspondiente al 40% (Autoridad Local del Agua Chili, 2015), la mencionada en el proyecto SNIP que equivale a 41% (Comisión de Bajo Cural, 2008), y la asignada por el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la cuenca Quilca Chili que equivale a 43% para la zona del Chili Regulado (ANA et al., 2013), estos porcentajes pueden estar influenciados directamente por la eficiencia de aplicación debido a que algunos autores recomiendan usar 40% para riego por gravedad y para el caso de la investigación se tomó los lineamientos del MINAGRI, el cual propuso una eficiencia correspondiente a 30%.

De este modo los volúmenes de agua necesarios incrementarían exuberantemente, usando la eficiencia de riego propuesta por la delimitación del bloque de riego del Bajo Cural se tendría un volumen necesario de 11214.98 mm para la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith, 11277.07 mm para el algoritmo de evapotranspiración actual según SEBAL y 11849.13 mm para la licencia actual, en cambio, basado en los aforos realizados para Penman-Monteith se tendría un volumen equivalente a 16814.06 mm, 16907.15 mm para SEBAL y 17764.81 mm para la licencia actual. Es importante resaltar que estos valores son tomados como milímetros por cultivo o Litros por metro cuadrado por periodo de cultivo, es calculado de esta manera debido a la limitación que hubo al no encontrar la misma lista de cultivos establecidas en la delimitación de bloque de riego para el Bajo Cural limitando la comparación en función de los cultivos y no en función del área total que ocupen los cultivos, así que estos valores van a aumentar considerablemente en función de las hectáreas totales, siendo para el bajo cural 186868000 m², por lo que los valores de necesidades hídricas aumentan en un orden de 1E⁹ cifras.

IV.IV. Base de Datos

La estructura del código realizado mediante `psycopg2` se visualiza en el (Anexo 15, pág. 186-189), durante el procedimiento se logró encontrar que las tablas correspondientes al shapefile de parcelas y la de rol de riego no guardan completa relación, no se identificaron codificaciones para los usuarios en todas las tablas, los propietarios o inquilinos presentes en algunas parcelas no coincidían con lo estipulado en el rol de riego proporcionado y en algunos casos los propietarios tenían dos parcelas en una sola fila. Debido a la falta de codificaciones para los usuarios se hicieron uniones en las dos tablas tomando como atributo de comparación el número de lote, basado en el rol de riego se debería tener 649 usuarios pero esto no coincidió con lo encontrado en las parcelas, el resultado de la unión entre el rol y las parcelas denotó un registro de 614 parcelas, por lo cual se tienen 35 usuarios que no están relacionados con alguna parcela o que sus atributos no cuentan con el número de parcela o fueron digitados erróneamente.

Según la tabla correspondiente al rol de riego y las encuestas realizadas se identificó que la mayoría denota un área de 2.5 ha reflejándose esto en la tabla de rol de riego la cual denota 473 registros con 2.5 ha, este valor fue comprobado mediante PostGIS y no se obtuvo ningún registro con 2.5 ha exactas siendo su percentil 75 equivalente a 2.5 ha, esto puede ser reflejado en la Figura 40 la cual contiene un gráfico comparativo entre las áreas registradas en el rol de riego y las áreas registradas en el shapefile de parcelas, y en la Tabla 26 se presenta los estadísticos descriptivos basados en el análisis con PostGIS. En función de esto ya se puede utilizar esta base de datos de código libre como un Sistema de Información Geográfico el cual puede ser enlazado con sistemas SIG-web o SIG de escritorio, usando PostGIS como un vínculo que añade funciones complementarias el cual permitiría monitorear la actividad de las irrigaciones, manejar la irrigación, y optimizar el recurso hídrico disponible, convirtiéndose en una herramienta

importante para la gestión de agua y toma de decisiones (Piedelobo et al., 2018).

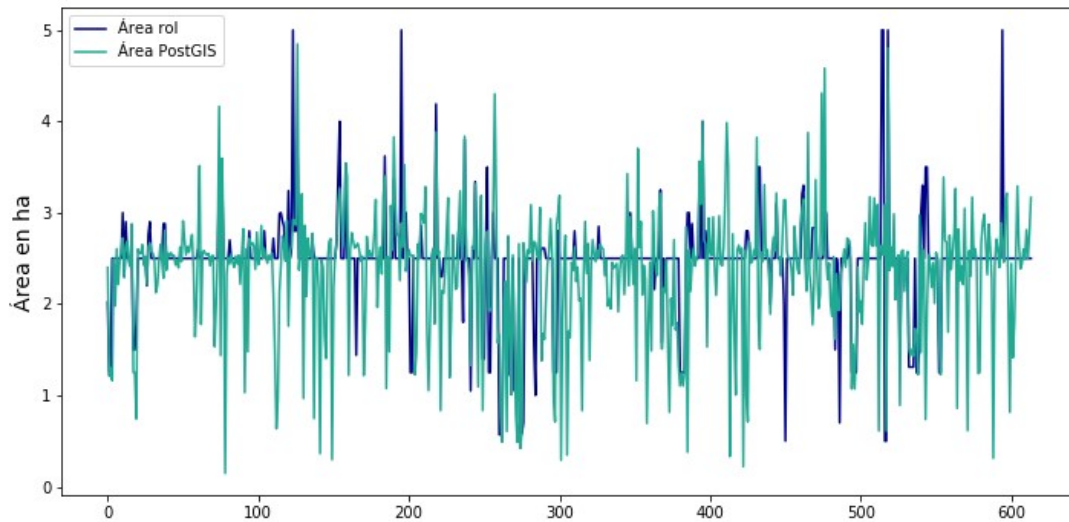


Figura 40: Comparación del área definida en el rol de riego y la de PostGIS

Tabla 26: Estadísticos descriptivos para las áreas establecidas según el rol de riego y las definidas por PostGIS

	Área según Rol de Riego (ha)	Área según PostGIS (ha)
Promedio	2.47	2.35
Desviación Estándar	0.53	0.70
Mínimo	0.50	0.15
Máximo	5.00	4.85
Percentil 25	2.50	2.11
Percentil 50	2.50	2.50
Percentil 75	2.50	2.66

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se recolectó información correspondiente al catastro agrario, infraestructura hidráulica, condiciones meteorológicas y rol de riego actual, esta información se transformó al formato shapefile, hojas de cálculo y archivos de texto delimitados por comas para su posterior procesamiento y análisis descriptivo.

Se elaboraron modelos de requerimiento hídrico basado en el cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante las ecuaciones de Penman-Monteith y SEBAL. El total de milímetros necesarios para los cultivos encontrados según Penman-Monteith es igual a 4485.99, el de SEBAL equivale a 4510.83 y el correspondiente a la licencia actual equivale a 4739.65 mm. Los cálculos realizados según la licencia actual están alterados por los efectos de la ciudad en los datos meteorológicos, los datos de Penman-Monteith y SEBAL tienen buena correlación, pero SEBAL tiene mayor fiabilidad debido a que los cálculos son distribuidos para toda el área asignada y no usa constantes relacionadas a los cultivos como lo hace Penman-Monteith, siendo estas constantes poco estudiadas en la región Arequipa.

La eficiencia de riego calculada según los aforos realizados equivale a un 26.68% y la eficiencia de riego usada por la licencia actual equivale a 40.00%; usando la eficiencia propuesta por la licencia actual se tendría un volumen necesario para Penman-Monteith, SEBAL y la licencia actual de 11214.98 mm, 11277.07 mm y 11849.13 mm respectivamente, en cambio, basado en los aforos realizados, se tienen volúmenes necesarios para Penman-Monteith, SEBAL y la licencia actual equivalentes a 16814.06 mm, 16907.15 y 17764.81 respectivamente.

Con el uso de la base de datos se pudo identificar que de 649 usuarios de los laterales 1 al 8 se tiene únicamente 614 bien relacionados, se identifica que las parcelas no son uniformes, las áreas varían de 0.5 a 5 hectáreas, por lo que se pudo comprobar que el uso de SIG manipula fácilmente los datos y apoyaron adecuadamente en el cálculo de los volúmenes de agua especialmente para SEBAL, el cuál cuenta con valores distribuidos.

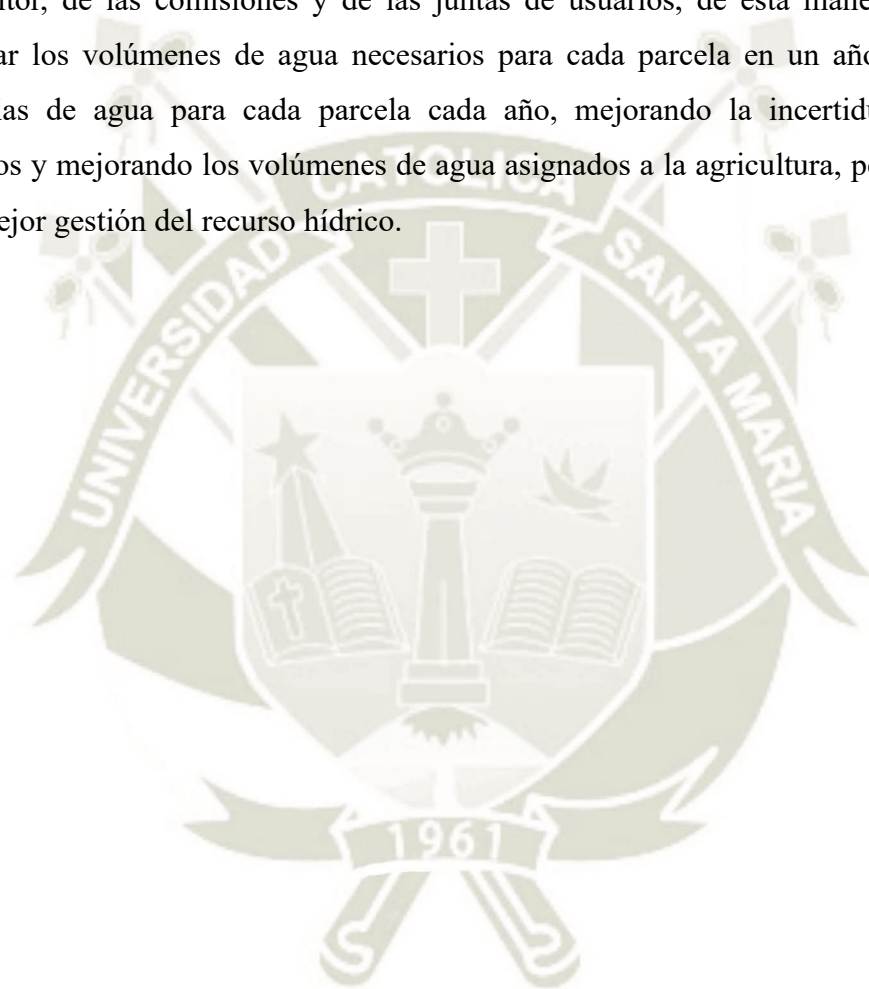
RECOMENDACIONES

Las entidades encargadas de proporcionar la información deberían contar con un servidor unificado codificado y actualizado, esto debido a que muchas instituciones otorgaban información diferente, adicionalmente se deben equipar estaciones meteorológicas automáticas con información cada hora como mínimo en cada irrigación con el fin de tener valores precisos y poder calcular eficientemente las necesidades hídricas.

Se deben mejorar las variables vinculadas a los cultivos, específicamente las usadas por Penman-Monteith, esto debido a que muchas de las variables provenientes de la licencia actual no tenían referencias científicas, ejemplos de estas son los coeficientes de cultivo y agotamiento crítico, las cuales son importantes para el cálculo de las necesidades hídricas. Las líneas de comando de SEBAL deben ser completamente automatizadas al momento del cálculo de los pixeles calientes y fríos mediante estadística o aprendizaje automático, esto con el fin de reducir el error humano. Se debe realizar análisis de sensibilidad a los modelos de requerimiento hídrico con el de visualizar los efectos positivos o negativos en la economía y el ambiente de diferentes estrategias de gestión, introducciones de nuevos métodos de riego y métodos de riego que puedan variar la eficiencia y/o productividad.

Las eficiencias de riego deben hacerse con múltiples equipos con el fin de abarcar la extensión completa de la irrigación, aforando cada canal y realizando estudios específicos en cada irrigación con respecto a las eficiencias de aplicación. Se debe contar con un mantenimiento constante de la zona debido a que muchas de las compuertas filtraban agua (Anexo 16, pág. 190), aumentar las trampas para sólidos, implementar compuertas automáticas e implementar el riego por goteo en toda la irrigación.

Cada parcela debería tener una codificación independiente del agricultor para relacionar toda su información, de esta manera se podrían crear registros de las intenciones de siembra anuales asignadas a las parcelas mediante una base de datos asociada a un SIG web con la facilidad de uso de las herramientas de PostGIS que servirían como un servidor agrario implementado con código libre, el cual permita la interacción del agricultor, de las comisiones y de las juntas de usuarios, de esta manera se podrían calcular los volúmenes de agua necesarios para cada parcela en un año, creando así licencias de agua para cada parcela cada año, mejorando la incertidumbre de los cálculos y mejorando los volúmenes de agua asignados a la agricultura, permitiendo así una mejor gestión del recurso hídrico.



BIBLIOGRAFÍA

- Abtew, W., & Melesse, A. M. (2013). *Evaporation and evapotranspiration: measurements and estimations*. Dordrecht ; New York: Springer.
- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M. H., Bastiaanssen, W., & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC: SATELLITE-BASED ET ESTIMATION WITH SEBAL AND METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011-4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>
- ANA. (2016). *Inventario de Presas en el Perú* (N.º 1; p. 97). Recuperado de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/inventario_de_presas_0.pdf
- ANA. (2017). *Compendio Nacional de Estadísticas de Recursos Hídricos 2016* (N.º 1; p. 224).
- ANA, TYPASA, & BM. (2013). *Plan de Gestión de Recursos Hídricos en la Cuenca Quilca-Chili* (p. 161). Arequipa.
- Andales, A., Chavez, J., & Bauder, T. (s. f.). Irrigation Scheduling: The Water Balance Approach - 4.707. Recuperado 27 de octubre de 2018, de Extension website: <http://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/irrigation-scheduling-the-water-balance-approach-4-707/>
- Anderson, K., Ryan, B., Sonntag, W., Kavvada, A., & Friedl, L. (2017). Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Geo-spatial Information Science*, 20(2), 77-96. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1333230>
- Autoridad Local del Agua Chili. (2015). *Formalización de Derechos de Agua con fines Agrarios para la Comisión de Usuarios Sub Sector Bajo Cural* (N.º R.D. 1493-2015).

- Avinash, K., Dubey, O., & Ghosh, S. (2014). GIS BASED IRRIGATION WATER MANAGEMENT. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(14), 2321-7308.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 87-100.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Bos, M. G. (Ed.). (2009). *Water requirements for irrigation and the environment*. Dordrecht: Springer.
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bulut, Y., Toy, S., Irmak, M. A., Yilmaz, H., & Yilmaz, S. (2008). Urban-rural climatic differences over a 2-year period in the City of Erzurum, Turkey. *Atmósfera*, 21, 121-133.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed). New York: Guilford Press.
- Caswell, T. A., Droettboom, M., Hunter, J., Firing, E., Lee, A., Klymak, J., ... Ernest, E. (2019, febrero 26). *matplotlib/matplotlib* v3.0.3.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.2577644>
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach*. Recuperado de https://nls.ldls.org.uk/welcome.html?ark:/81055/vdc_100044258673.0x000001
- Comisión de Bajo Cural. (2008). *ESTUDIO DE PRE INVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL: "PROYECTO INTEGRAL DE RIEGO TECNIFICADO Y PRODUCTIVIDAD AGROEXPORTABLE, IRRIGACIÓN BAJO CURAL"*. Arequipa.

- Dastane, N. G. (1978). *Effective rainfall in irrigated agriculture* (Neudr.). Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/x5560e/x5560e03.htm#3.5.2%20rice%20measurement%20in%20rice>
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3. ed). Long Grove, Ill: Waveland Press.
- Droj, G. (2012). GIS and remote sensing in environmental management. *Journal of environmental protection and ecology*, 2.
- Elbana, M., Bakr, N., & Karajeh, F. (2017). Implication of Geo-Informatics (GIS/RS) on Agricultural Irrigation Management: The State of the Art. En *The Handbook of Environmental Chemistry*. SpringerLink (pp. 1-21). https://doi.org/10.1007/698_2017_174
- El-Magd, I. A., & Tanton, T. (2005). Remote sensing and GIS for estimation of irrigation crop water demand. *International Journal of Remote Sensing*, 26(11), 2359-2370. <https://doi.org/10.1080/0143116042000298261>
- Elmasri, R., & Navathe, S. (2011). *Fundamentals of database systems* (6th ed). Boston: Addison-Wesley.
- EORC, & JAXA. (2018). *ALOS Global Digital Surface Model (DSM)* (Descripción de Producto N.º v. 2.1.; p. 9). Recuperado de JAXA, EORC website: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v21_format_e.pdf
- ESA. (2015). *Sentinel-2 User Handbook* (Manual N.º 1; p. 64). Recuperado de ESA website: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- ESA. (2018a). Missions - Sentinel Online. Recuperado 5 de septiembre de 2018, de Sentinel Online website: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- ESA. (2018b). *Sen2Cor Configuration and User Manual* (Manual N.º v2.5.5; p. 54). Recuperado de http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.5.5_V2.pdf

- Falahah, & Ayuningtias, D. K. (2014). Visualization of condition irrigation building and canal using web GIS application. *2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering*, 309-314. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2014.7065762>
- FAO. (1985). *Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation, Training manual no. 1*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e00.htm#Contents>
- FAO. (1986). *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs Training manual no. 3*. Roma: The International Support Programme for Irrigation Water Management.
- FAO. (1989). *Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling, Training manual no. 4*. Roma.
- FAO. (1997). *Irrigation potential in africa: a basin approach*. Rome: FAO.
- FAO, & CAF. (2004). *Perú, Nota de Análisis Sectorial Agricultura y Desarrollo Rural* (p. 65).
- Faris, A., Al-Sulttani, A., Ochtyra, A., Jarocin´ska, A., & Marcinkowska, A. (2016). Estimation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Landsat-8 Data—A Case Study: Tatra Mountains Region. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 4(6). <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2016.06.002>
- Flores, J. (2018, marzo 23). Gestión de Riego mediante SIG Caso de Estudio Comunidad El Arrayán, Parroquia Angochagua, Ibarra. Recuperado 3 de julio de 2018, de Issuu website: https://issuu.com/unigis_latina/docs/merged__1_
- García, M., Puppo, L., Hayashi, R., & Morales, P. (2012). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*. 10.
- Geethika, C., & Asadi, S. (2016). Spatial Data Base Creation For Effective Irrigation Management: A Model Study. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 11(2), 383-397.

- George, B. A., Raghuwanshi, N. S., & Singh, R. (2004). Development and testing of a GIS integrated irrigation scheduling model. *Agricultural Water Management*, 66(3), 221-237. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.11.004>
- Gotardo, J. T., Rodrigues, L. N., & Gomes, B. M. (2016). COMPARISON OF METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION: AN APPROACH TO THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES WITHIN AN EXPERIMENTAL BASIN IN THE BRAZILIAN CERRADO. *Engenharia Agrícola*, 36, 1016-1026.
- GRASS Development Team. (2018). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software (Versión 7.4.1). Recuperado de <https://grass.osgeo.org/>
- Huizhi, L., & Jianwu, F. (2012). Seasonal and Interannual Variations of Evapotranspiration and Energy Exchange over Different Land Surfaces in a Semiarid Area of China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(10), 1875-1888. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0229.1>
- Illiffe, J., & Lott, R. (2008). *Datums and map projections for remote sensing, GIS and surveying* (2. ed). Dunbeath: Whittles [u.a.].
- Instituto Geográfico Nacional. (2011). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA BÁSICA ESCALA 1:5 000* [Norma Técnica]. Recuperado de IGN website: <http://www.ign.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/ESPECIFICACIONES-TECNICAS-PARA-LA-PRODUCCION-1-5.000.pdf>
- Jaber, H., Mansor, S., Pradhan, B., & Ahmad, N. (2011). Using Remote Sensing and GIS for Assessment of Irrigation Performance in the Al-Hindiyah Barrage, Babil City, Iraq. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), 462-470. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2016.462.470>

- Jelokhani-Niaraki, M., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S.-M. (2018). Semantic interoperability of GIS and MCDA tools for environmental assessment and decision making. *Environmental Modelling & Software*, *100*, 104-122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.011>
- Jeppesen, J. H., Ebeid, E., Jacobsen, R. H., & Toftegaard, T. S. (2018). Open geospatial infrastructure for data management and analytics in interdisciplinary research. *Computers and Electronics in Agriculture*, *145*, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.026>
- Jiménez, P., Villasante, J., Talavera, B., & Villegas, L. (s. f.). Ecosistemas de Arequipa. Oferta Ambiental y Desarrollo Sostenible. *Instituto Regional de Ciencias Ambientales de la UNSA*.
- Jones, E., Oliphant, T., Peterson, P., & others. (2001). *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Recuperado de <http://www.scipy.org/>
- Junta de Usuarios Chili Zona Regulada. (2017). *Sistema Regulado del Río Cili - Plan de Distribución Mayo 2017*. Arequipa.
- Kaplan, G., Avdan, U., & Avdan, Z. Y. (2018). Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. *Proceedings*, *2(7)*, 358. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05171>
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations* (Second edition). Amsterdam ; Boston: Elsevier.
- Kosa, P. (2011). The Effect of Temperature on Actual Evapotranspiration based on Landsat 5 TM Satellite Imagery. En L. Labedzki (Ed.), *Evapotranspiration*. <https://doi.org/10.5772/14012>
- Libelula. (2011). *Diagnóstico de la Agricultura en el Perú* (p. 71).
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (Seventh edition). Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, Inc.

- Madugundu, R., Al-Gaadi, K. A., Tola, E., Hassaballa, A. A., & Patil, V. C. (2017). Performance of the METRIC model in estimating evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia using Landsat-8 images. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6135-6151. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6135-2017>
- Mandal, B., Dolui, G., & Satpathy, S. (2017). Land suitability assessment for potential surface irrigation of river catchment for irrigation development in Kansai watershed, Purulia, West Bengal, India. *Sustainable Water Resources Management*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0155-y>
- Martin, J., Eugenio, F., Marcello, J., Medina, A., Bermejo, J. A., & Arbelo, M. (2012, noviembre 1). *Atmospheric correction models for high resolution WorldView-2 multispectral imagery: a case study in Canary Islands, Spain* (E. I. Kassianov, A. Comeron, R. H. Picard, K. Schäfer, U. N. Singh, & G. Pappalardo, Eds.). <https://doi.org/10.1117/12.974564>
- Mbah, C. N. (2012). Determining the Field Capacity, Wilting point and Available Water Capacity of some Southeast Nigerian Soils using Soil Saturation from Capillary Rise. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 24(0). Recuperado de <https://www.ajol.info/index.php/njb/article/view/104514>
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. En S. van der Walt & J. Millman (Eds.), *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* (pp. 51-56).
- MINAGRI. (2015a). *Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego*. Lima.
- MINAGRI. (2015b). *Plan Estratégico Sectorial Multianual 2015-2021* (p. 186). Lima.
- MINAGRI. (2018). *Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra ENIS 2018* (Lineamiento metodológico N.º ENIS-DOC.001-DGESEP-DEA-2018). Recuperado de <http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/Lineamientos%20Metodologicos%20ENIS%202018.pdf>

- MINAGRI, & PSI. (2005). *Manuales para Mejorar la Gestión de los Sistemas de Riego en las Organizaciones de Usuarios de agua* [Manual]. Lima: MINAGRI, PSI.
- MINEM. (2001). *GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES NUEVAS: ENERGÍA SOLAR*. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia_solar.pdf
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N., & Teillet, P. M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3), 169-184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-V)
- Najmaddin, P. M., Whelan, M. J., & Balzter, H. (2017). Estimating Daily Reference Evapotranspiration in a Semi-Arid Region Using Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 9(8), 779. <https://doi.org/10.3390/rs9080779>
- NASA. (2018, agosto 30). A Landsat Timeline «Landsat Science. Recuperado 5 de septiembre de 2018, de Landsat Science website: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/>
- Neuwirth, C. (2017). System dynamics simulations for data-intensive applications. *Environmental Modelling & Software*, 96, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.017>
- North Carolina Climate Office. (s. f.). Evapotranspiration [North Carolina Climate Office]. Recuperado de <https://climate.ncsu.edu/>
- Novák, V. (2012). *Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system*. Dordrecht ; New York: Springer.
- Nuñez, A., & Hurtado, E. (2015). *Cuadernillo de Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego*. Lima: MINAGRI.

- Obe, R. O., & Hsu, L. S. (2015). *PostGIS in action* (Second edition). Shelter Island, NY: Manning.
- Oberg, J. W., & Meless, A. M. (2006). EVAPOTRANSPIRATION DYNAMICS AT AN ECOHYDROLOGICAL RESTORATION SITE: AN ENERGY BALANCE AND REMOTE SENSING APPROACH. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 565-582. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04476.x>
- Olaya, V. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Opazo González, T. (2009). *Modelo Hidrogeológico Conceptual de las Cuencas Altiplánicas Fronterizas Mucar y Sico, II Región de Antofagasta* (Universidad de Chile). Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103435>
- Panigrahi, N. (2014). *Computing in geographic information systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Paulson, C. A. (1970). The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology*, 9(6), 857-861. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2)
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome: FAO.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Piedelobo, L., Ortega-Terol, D., del Pozo, S., Hernández-López, D., Ballesteros, R., Moreno, M., ... González-Aguilera, D. (2018). HidroMap: A New Tool for Irrigation Monitoring and Management Using Free Satellite Imagery. *ISPRS*

- International Journal of Geo-Information*, 7(6), 220.
<https://doi.org/10.3390/ijgi7060220>
- PostgreSQL: The world's most advanced open source database. (s. f.). Recuperado 1 de noviembre de 2018, de <https://www.postgresql.org/>
- QGIS Development Team. (2009). *QGIS Geographic Information System*. Recuperado de <http://qgis.org>
- Rahimi, S., Gholami Sefidkouhi, M. A., Raeini-Sarjaz, M., & Valipour, M. (2015). Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(5), 695-709.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2014.944904>
- Ramos, J. G., Cratchley, C. R., Kay, J. A., Casterad Seral, M. A., Herrero Isern, J., & Martínez-Cob, A. (2005). *Comparison of the SEBAL and the traditional FAO procedure for water volume estimation in an irrigation district*. Recuperado de <https://digital.csic.es/handle/10261/61469>
- Richard, S. (2003, mayo 3). *Top Ten Problems of Humanity for Next 50 Years*. Presentado en Energy & NanoTechnology Conference, Rice University.
- Santillan, J. R., & Makinano-Santillan, M. (2016). VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF 30-M RESOLUTION ALOS, ASTER, AND SRTM GLOBAL DEMS OVER NORTHEASTERN MINDANAO, PHILIPPINES. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4, 149-156. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

- Silva, Bernardo B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 3-8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>
- Silva, Bruno Bonemberger da, Mercante, E., Boas, M. A. V., Wrublack, S. C., & Oldoni, L. V. (2018). Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. *Revista Ciência Agronômica*, 49(2), 221-227. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180025>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Sola, I., García-Martín, A., Sandonís-Pozo, L., Álvarez-Mozos, J., Pérez-Cabello, F., González-Audicana, M., & Montorio Llovería, R. (2018). Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 images in Mediterranean landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.020>
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230-244. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- Spatial Databases - Build Your Spatial Data Empire. (2015, diciembre 10). Recuperado 1 de noviembre de 2018, de GIS Geography website: <https://gisgeography.com/spatial-databases/>
- Stack Overflow Developer Survey 2018. (s. f.). Recuperado 31 de octubre de 2018, de Stack Overflow website: [https://stackoverflow.com/insights/survey/2018/?](https://stackoverflow.com/insights/survey/2018/)

utm_source=so-owned&utm_medium=social&utm_campaign=dev-survey-2018&utm_content=social-share

- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2006). *Respuesta de Rendimiento de los cultivos al Agua*. Rome: FAO.
- Tasumi, M., Allen, R. G., & Trezza, R. (2008). At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 51-63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51))
- Ticona, O. (1996). *Estudio comparado de la evapotranspiración medida y la calculada por métodos empíricos en la irrigación Majes-Arequipa*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa.
- Todorovic, M., & Steduto, P. (2003). A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(4), 163-174. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00023-8)
- Tóth, K., & Kučas, A. (2016). Spatial information in European agricultural data management. Requirements and interoperability supported by a domain model. *Land Use Policy*, 57, 64-79. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.05.023>
- Trimble, S. W. (2008). *Encyclopedia of Water Science*. CRC Press.
- Tzai-Hung, W., Chun-Hung, L., Ching-Tien, C., & Ming-Daw, S. (2007). Analysis of Spatial Scenarios Aiding Decision Making for Regional Irrigation Water-Demand Planning. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), 455-467. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:5\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(455))
- Unión Europea. *REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2018/746 DE LA COMISIÓN de 18 de mayo de 2018 por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) n.o 809/2014 en lo que respecta a la modificación de las solicitudes únicas y solicitudes de pago y a los controles.*, (2018).

- United Nations. (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- United States. Soil Conservation Service. (1993). *National engineering handbook. Part 623, Chapter 2, Irrigation Water Requirements*. Recuperado de <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch2.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2015). *Landsat—Earth observation satellites* (Report N.º ver. 1.1; p. 4). Recuperado de U.S. Geological Survey website: <https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3081/fs20153081.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2016). *LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK* (Manual N.º ver. 2.0.; p. 106). Recuperado de U.S. Geological Survey website: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. (2011). The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. *Computing in Science & Engineering*, 13(2), 22-30. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37>
- Van Sickle, J. (2017). *Basic GIS coordinates* (Third edition). Boca Raton: Taylor & Francis.
- Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., & Trezza, S. (2002). *Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation*. Idaho, USA.
- Webb, E. K. (1970). Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(407), 67-90. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wolff, W. (2016, noviembre 17). *Wwolff7/Sebal_Grass*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.167350>

- Woodhouse, I. H. (2006). *Introduction to microwave remote sensing*. Boca Raton: Taylor&Francis.
- Xplenty. (2017, septiembre 28). The SQL vs NoSQL Difference: MySQL vs MongoDB. Recuperado 31 de octubre de 2018, de Xplenty Blog website: <https://medium.com/xplenty-blog/the-sql-vs-nosql-difference-mysql-vs-mongodb-32c9980e67b2>
- Zhang, F., Li, H., Wang, W., Li, Y., Lin, L., Guo, X., ... Li, Y. (2018). Net radiation rather than surface moisture limits evapotranspiration over a humid alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecohydrology*, 11(2), e1925. <https://doi.org/10.1002/eco.1925>
- Стојановић, Ж., & Манић, Е. (2011). Geographic information systems for rural development planning and management. *Economics of Agriculture*. Presentado en International Scientific Meeting Sustainable Agriculture and Rural Development in Terms of the Republic of Serbia Strategic Goals Implementation within Danube Region, , Vrdnik Spa (Serbia), 1-2 Dec 2011. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=RS2012002639>

ANEXOS

ANEXO 1: SOLICITUD DIRIGIDA A SENAMHI



Universidad Católica de Santa María

(51 54) 382038 Fax:(51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado:1350

AREQUIPA - PERU

"IN SCIENTIA ET FIDE ERIT FORTITUDO NOSTRA"
(En la Ciencia y en la Fe está nuestra Fortaleza)

Arequipa, 20 de agosto del 2018

CARTA N° 065-EPIA-2018

Señor Blgo.
GUILLERMO GUTIÉRREZ PACO
Director Zonal 6 del SENAMHI
Presente.-

De mi especial consideración:

Tengo a bien dirigirle el presente para llevarle el saludo Institucional de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa, y en especial de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, y a la vez presentarle al señor:

JONATHAN ANDRE QUIROZ VALDIVIA

El mencionado, se encuentra desarrollando el plan de tesis titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO EFICIENTE DE USO DE AGUA DESTINADO PARA LA AGRICULTURA BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA EN LA IRRIGACIÓN DEL BAJO CURAL"**.

En tal sentido, le solicito se sirva autorizar a quien corresponda se brinde la información de la estación meteorológica convencional HUASACACHE en escala diaria de los últimos 30 años correspondiente a las variables de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitaciones pluviales y velocidad de viento, temperatura de bulbo seco y húmedo.

Por la atención que le merezca la presente y por las facilidades que brinde a nuestro bachiller para el cumplimiento de su cometido, desde ya, le manifestamos nuestro agradecimiento.

Conocedores de su amplio espíritu de colaboración, hago propicia la ocasión para reiterar los sentimientos de mi mayor consideración y deferencia personal.

Atentamente.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA


Ing. MILAGROS SOCORRO GUILLEN MALAGA
DIRECTORA DE LA ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA AMBIENTAL

MSGM/EPIA
C.c. Arch.
C.v.

ANEXO 2: SOLICITUD DIRIGIDA A LA JUNTA DE USUARIOS CHILI ZONA REGULADA



Universidad Católica de Santa María

(51 54) 382038 Fax:(51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado:1350

AREQUIPA - PERU

“IN SCIENTIA ET FIDE ERIT FORTITUDO NOSTRA”
(En la Ciencia y en la Fe está nuestra Fortaleza)

Arequipa, 20 de agosto del 2018

CARTA N° 066-EPIA-2018

Señor
JUAN ALVAREZ CHAVEZ
Presidente de la Junta de Usuarios del Distrito
de Riego “Chili Zona Regulada”
Presente.-



De mi especial consideración:

Tengo a bien dirigirle el presente para llevarle el saludo Institucional de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa, y en especial de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, y a la vez presentarle al señor:

JONATHAN ANDRE QUIROZ VALDIVIA

El mencionado, se encuentra desarrollando el plan de tesis titulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO EFICIENTE DE USO DE AGUA DESTINADO PARA LA AGRICULTURA BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA EN LA IRRIGACIÓN DEL BAJO CURAL”.

En tal sentido, le solicito se sirva autorizar a quien corresponda se brinde la información sobre Inventario de la Infraestructura hidráulica del Chili Regulado en formato Geodatabase PDF; Programación de riego de la irrigación del Bajo Cural por laterales de los últimos 5 años.

Por la atención que le merezca la presente y por las facilidades que brinde a nuestro bachiller para el cumplimiento de su cometido, desde ya, le manifestamos nuestro agradecimiento.

Conocedores de su amplio espíritu de colaboración, hago propicia la ocasión para reiterar los sentimientos de mi mayor consideración y deferencia personal.

Atentamente.

MSGM/EPIA
C.c. Arch.
C.x.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
M. Guillén
ING. MILAGROS SOCORRO GUILLEN MALAGA
DIRECTORA DE LA ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERIA AMBIENTAL

ANEXO 3: SOLICITUD A LA AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA

	SOLICITUD DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA (Texto Único Ordenado de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM)	N° DE REGISTRO
	FORMULARIO	

I. FUNCIONARIO RESPONSABLE DE ENTREGAR LA INFORMACIÓN:
 Ing. Alberto Domingo Osorio Valencia

II. DATOS DEL SOLICITANTE:

APELLIDOS Y NOMBRES / RAZÓN SOCIAL Quirós Valdovinos Jonathan Andre		DOCUMENTO DE IDENTIDAD D.N.I./L.M./C.E./OTRO D.N.I. 72417349	
DOMICILIO			
AV/CALLE/JR/PSJ.	N°/DPTO./INT.	DISTRITO	URBANIZACIÓN
		Sachaca	Tahuaycani C-15
PROVINCIA	DEPARTAMENTO	CORREO ELECTRÓNICO	TELÉFONO
Arequipa	Arequipa	jonathanqv1@gmail.com	993780170

III. INFORMACIÓN SOLICITADA:

- Expediente con número CUT 103681-2015; además la información en formato "Shapefile" o "CAD"
- Expedientes y/o información de Infraestructura hidráulica del Sistema Regulado de preferencia información en "Shapefile" o "CAD" Chile

IV. DEPENDENCIA DE LA CUAL SE REQUIERE LA INFORMACIÓN:
 AAA I CAPLINA - OCOÑA

V. FORMA DE ENTREGA DE LA INFORMACIÓN (marcar con una "X")

COPIA SIMPLE	DISQUETE	CD	<input checked="" type="checkbox"/> CORREO ELECTRÓNICO	OTRO	USB
--------------	----------	----	--	------	-----

VI. AUTORIZACIÓN PARA RECIBIR RESPUESTA DE LA SOLICITUD POR CORREO ELECTRÓNICO:

AUTORIZO (X) NO AUTORIZO ()


APELLIDOS Y NOMBRES Quirós Valdovinos Jonathan Andre FIRMA	FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN
--	-------------------------------

OBSERVACIONES:

NOTA: PRESENTAR EN MESA DE PARTES, EN ORIGINAL Y COPIA

497585^{2 p.m} => Anexo 709- Sr. Rosa Lods.

ANEXO 4: SOLICITUD A LA AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA

 ANA Autoridad Nacional del Agua	SOLICITUD DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA (Texto Único Ordenado de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM)	N° DE REGISTRO
		FORMULARIO

I. FUNCIONARIO RESPONSABLE DE ENTREGAR LA INFORMACIÓN:
 ALS CHILI ING. PANTALÓN HUACHANI

II. DATOS DEL SOLICITANTE:

APELLIDOS Y NOMBRES / RAZÓN SOCIAL Quiróz Valdivia Jonathan Andre		DOCUMENTO DE IDENTIDAD D.N.I./L.M./C.E./OTRO DNI: 72417349	
DOMICILIO			
AV/CALLE/JR/PSJ.	N°/DPTO./INT.	DISTRITO	URBANIZACIÓN
	2do Piso	Sachaca	Urb. Tahuaycan, C-15
PROVINCIA	DEPARTAMENTO	CORREO ELECTRÓNICO	TELÉFONO
Arequipa	Arequipa	jonathanqv1@gmail.com	993780170

III. INFORMACIÓN SOLICITADA:

- Copia digital de información de Infraestructura Hidráulica del Sub Sector Cural (Bajo) CUT: 103681-2015 en formato "shapefile", adjunto 01 CD

IV. DEPENDENCIA DE LA CUAL SE REQUIERE LA INFORMACIÓN:

AAA I CAPLINA - OCOÑA

V. FORMA DE ENTREGA DE LA INFORMACIÓN (marcar con una "X")

COPIA SIMPLE	DISQUETE	CD	<input checked="" type="checkbox"/> CORREO ELECTRÓNICO	OTRO
--------------	----------	----	--	------

VI. AUTORIZACIÓN PARA RECIBIR RESPUESTA DE LA SOLICITUD POR CORREO ELECTRÓNICO:

AUTORIZO () NO AUTORIZO ()

APELLIDOS Y NOMBRES Quiróz Valdivia Jonathan Andre FIRMA	FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN
--	---------------------------

OBSERVACIONES:

NOTA: PRESENTAR EN MESA DE PARTES, EN ORIGINAL Y COPIA

ANEXO 5: LÍNEAS DE COMANDO PARA EL PROCESAMIENTO DE SEBAL

```
import numpy
import math
import os
import re
import grass.script as gscript
import numpy as np
from osgeo import gdal
output_path = 'C:\Users\Jonathan\Desktop\SEBALS\Outputs\SEBAL20170818'
os.chdir("C:\Users\Jonathan\Desktop\SEBALS\
LC08_L1TP_003071_20170818_20170826_01_T1")
#For "El Bajo Cural" the mean wind speed is 3.4817
u_2m = float(input('Place the wind speed value for height of the 2 m measured in the
weather station - (m/s): '))

MTLfile = [i for i in os.listdir('.') if i.endswith('MTL.txt')]
files = [i for i in os.listdir('.') if i.endswith('.TIF','.tif')]
#Ordering
convert = lambda text: int(text) if text.isdigit() else text
alphanum_key = lambda key: [convert(c) for c in re.split('[0-9]+', key)]
files = sorted(files, key = alphanum_key)

#solar zenith
for line in open(MTLfile[0]):
    if "SUN_ELEVATION"+" " in line:
        sun_elev = float(line.split("=")[-1])
solar_zenith = (90 - sun_elev)*math.pi/180

#Earth-sun distance
for line in open(MTLfile[0]):
    if "EARTH_SUN_DISTANCE"+" " in line:
```

```

d = float(line.split("=")[-1])

#ESUN values
ESUN2,ESUN3,ESUN4,ESUN5,ESUN6,ESUN7 = 2067,1893,1603,972.6,245,79.72
ESUN = [2067,1893,1603,972.6,245,79.72]
#WEIGHTING ESUN COEFFICIENTS
w=[]
for i in range(len(ESUN)):
    w.append(ESUN[i]/sum(ESUN))
w2=w[0]
w3=w[1]
w4=w[2]
w5=w[3]
w6=w[4]
w7=w[5]
#file:///C:/Users/Jonathan/Downloads/A_survival_guide_to_Landsat_preprocessing.pdf

#THERMAL CONVERSION CONSTANTS
TC={"L10":{"K1":774.8853,"K2":1321.0789},"L11":{"K1":774.8853,"K2":1321.0789}}

print "Importing Landsat 8 Images..."
for i in range(len(files)):
    if 0 < i < 7:
        #importing files
        output_name=os.path.splitext(files[i])[0]
        gscript.run_command('r.import',input=files[i], output=output_name,overwrite=True)

#DNmin
ds = gdal.Open(output_name+'.TIF')
myarray = np.array(ds.GetRasterBand(1).ReadAsArray())
myarray = myarray.reshape((1,myarray.shape[0]*myarray.shape[1]))
myarray.sort()

```

```
totalSUM = np.sum(myarray)
q=[]
for z in range(myarray.shape[1]):
    if myarray[0][z] == 0:
        pass
    elif myarray[0][z] > 0:
        q.append(myarray[0][z])
        partialSUM = np.sum(q)
        if (partialSUM*100.0/totalSUM > 0.01):
            DNmin=q[-2]
            break
#Clipping files
output_clipname='LS8_C'+str(i+1)
gscript.run_command('r.clip',input=output_name,output=output_clipname,overwrite=T
rue)

#Radiancia
for line in open(MTLfile[0]):
    if "RADIANCE_MULT_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_RMB = float(line.split("=")[-1])
        value_RMB = format(value_RMB, '.5f')
for line in open(MTLfile[0]):
    if "RADIANCE_ADD_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_RAB = float(line.split("=")[-1])

output_radiance='LS8_C_SR'+str(i+1)
gscript.mapcalc('$SR = $DN * $RMB + $RAB',
SR=output_radiance,
DN=output_clipname,
RMB=value_RMB,
RAB=value_RAB,
overwrite='true')
```

```
#Reflectancia
for line in open(MTLfile[0]):
    if "REFLECTANCE_MULT_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_ReMB = float(line.split("=")[-1])
        value_ReMB = format(value_ReMB, '.5f')
for line in open(MTLfile[0]):
    if "REFLECTANCE_ADD_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_ReAB = float(line.split("=")[-1])

output_reflectance='LS8_C_SRe'+str(i+1)
gscript.mapcalc('$SR = ($DN * $ReMB + $ReAB)/$cos_solarzenith',
    SR=output_reflectance,
    DN=output_clipname,
    ReMB=value_ReMB,
    ReAB=value_ReAB,
    cos_solarzenith=math.cos(solar_zenith),
    overwrite='true')

#Lmin
Lmin = DNmin*float(value_RMB)+value_RAB
#LDOI1%
LDOI1 = 0.01*(ESUN[i-1]*math.cos(solar_zenith))/(math.pi*d**2)
#Lp
Lp = Lmin - LDOI1
#Surface Reflectance DOS1
gscript.mapcalc('$BOA = (($SR - $Lp)*$pi*$d^2)/($ESUN*$cos_solarzenith)',
    BOA='LS8_BOA'+str(i+1),
    SR=output_radiance,
    Lp=Lp,
    pi=math.pi,
    d=d,
    ESUN=ESUN[i-1],
```

```
cos_solarzenith=math.cos(solar_zenith),
overwrite='true')

elif i == 9 or i == 10:
    #importing files
    output_name=os.path.splitext(files[i])[0]
    gscript.run_command('r.import',input=files[i], output=output_name,overwrite=True)

    #Clipping files
    output_clipname='LS8_C'+str(i+1)
    gscript.run_command('r.clip',input=output_name,output=output_clipname,overwrite=True)

for line in open(MTLfile[0]):
    if "RADIANCE_MULT_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_RMB = float(line.split("=")[-1])
for line in open(MTLfile[0]):
    if "RADIANCE_ADD_BAND_"+str(i+1)+" " in line:
        value_RAB = float(line.split("=")[-1])
#TOA RADIANCE FOR THERMAL BANDS
gscript.mapcalc('$SR=$value_RMB*$DN+$value_RAB',
SR='LS8_C_SR'+str(i+1),
value_RMB=value_RMB,
value_RAB=value_RAB,
DN=output_clipname,
overwrite='true')

#TOA BRIGTHNESS TEMPERATURE
gscript.mapcalc('$BT=$K2/log($K1/$SR +1)',
BT='LS8_C_SR_BT'+str(i+1),
K1=TC["L"+str(i+1)]["K1"],
```

```

K2=TC["L"+str(i+1)]["K2"],
SR='LS8_C_SR'+str(i+1),
    overwrite='true')

#https://media.readthedocs.org/pdf/semiautomaticclassificationmanual-es/latest/
semiautomaticclassificationmanual-es.pdf
print 'Import FINISHED!'

#DEM
print 'Importing DEM...'
#os.chdir("C:\Users\Jonathan\Desktop\SEBALS\DEM")
#gscript.run_command('r.import',input='S017W072_AVE_DSM.tif',
output='DEM',overwrite=True)
print 'DEM imported!'

#albedo TOA
print 'Calculating albedo at top of atmosphere (aTOA)...'
gscript.mapcalc('aTOA=$LS8_corre2*$W2+$LS8_corre3*$W3+$LS8_corre4*$W4+
$LS8_corre5*$W5+$LS8_corre6*$W6+$LS8_corre7*$W7',
    LS8_corre2='LS8_C_SRe2',W2=w2,
    LS8_corre3='LS8_C_SRe3',W3=w3,
    LS8_corre4='LS8_C_SRe4',W4=w4,
    LS8_corre5='LS8_C_SRe5',W5=w5,
    LS8_corre6='LS8_C_SRe6',W6=w6,
    LS8_corre7='LS8_C_SRe7',W7=w7,
    overwrite='true')

#NDVI
print 'Calculating NDVI...'
gscript.mapcalc('NDVI=($LS8_BOA5-$LS8_BOA4)/($LS8_BOA5+$LS8_BOA4)',
    LS8_BOA5='LS8_BOA5',
    LS8_BOA4='LS8_BOA4',
    overwrite='true')
print 'Done!'

```

```

#SAVI
print 'Calculating SAVI..'
Lsavi = 0.5
gscript.mapcalc('SAVI=      (($LS8_corre5-$LS8_corre4)/($LS8_corre5+$LS8_corre4+
$Lsavi))*(1+$Lsavi)',
  LS8_corre4='LS8_C_SRe4',
  LS8_corre5='LS8_C_SRe5',
  Lsavi=Lsavi,
  overwrite='true')
print 'Done!'
#LAI
print 'Calculating leaf area index (LAI)...'
gscript.mapcalc('LAI=if(SAVI < 0.1, 0.00001,(if(0.1 < SAVI && SAVI < 0.687,-log((0.69-
SAVI)/0.59)/0.91,if(SAVI > 0.687,6,0))))',
  overwrite='true')
print 'Done!'
#eNB
print 'Calculating narrow band surface emissivity (eNBf)...'
gscript.mapcalc('eNB=if(LAI<3      &&      NDVI>0.,0.97+0.0033*LAI,if(LAI>=3      &&
NDVI>0.,0.98))',
  overwrite='true')
gscript.mapcalc('eNBf=if(eNB == 0, 0.99, eNB)',
  overwrite='true')
print 'Done!'
#e0
print 'Calculating broad band surface emissivity (e0f)...'
gscript.mapcalc('e0=if(LAI<3      &&      NDVI>0.,0.95+0.01*LAI,if(LAI>=3      &&
NDVI>0.,0.98))',
  overwrite='true')
gscript.mapcalc('e0f=if(e0 == 0, 0.985, e0)',
  overwrite='true')

```

```

print 'Done!'
#LST
print 'Calculating Land surface temperature...'
gscript.mapcalc('LST = $LS8_corre10/(1+((10.8*$LS8_corre10)/14380)*log($eNBf))',
  LS8_corre10='LS8_C_SR_BT10',
  eNBf='eNBf',
  overwrite='true')
print 'Done!'

#shortwave transmissivity of air (Tsw)
print 'Calculating shortwave transmissivity of air (Tsw)...'
gscript.mapcalc('Tsw=0.75+0.00002*$DEM',
  DEM='DEM',
  overwrite='true,')
print 'Done!'

#Surface Albedo
print 'Calculating surface albedo (aS)...'
gscript.mapcalc('aS=($aTOA-0.03)/($Tsw^2)',
  aTOA='aTOA',
  Tsw='Tsw',
  overwrite='true')
print 'Done!'

#RSi
print 'Calculating incoming shortwave radiation (Rsi) - W/m2...'
gscript.mapcalc('Rsi=1367*$cos_solarzenith*(1/($d^2))*$Tsw',
  Tsw='Tsw',
  cos_solarzenith=math.cos(solar_zenith),
  d=d,
  overwrite='true')
print 'Done!'

```

```
#RLo
print 'Calculating outgoing longwave radiation (RLo) - W/m2...'
gscript.mapcalc('RLo=$e0f*5.67e-8*$LST^4',
  LST='LST',
  e0f='e0f',
  overwrite='true')
print 'Done!'

medianLST = gscript.parse_command('r.quantile', input='LST', percentiles='50')
medianLST = float(str(medianLST).split(':')[2].split('')[0])

print 'Making the cold pixel mask...'
gscript.mapcalc('Pcold=if($NDVI>0.4 && $LST<$medianLST,$LST,null())',
  NDVI='NDVI',
  LST='LST',
  medianLST=medianLST,
  overwrite='true')
print 'Enhancing RGB colors..'
gscript.run_command('i.colors.enhance',red='LS8_C4',green='LS8_C3',blue='LS8_C2')
gscript.run_command('r.composite',red='LS8_C4',green='LS8_C3',blue='LS8_C2',output='r
gb',overwrite='true')

print 'Choose the cold pixel coordinates in irrigation areas. Use the raster Pcold, LST and
RGB_432(LS8_C#) for visualization...'
xy_Pcold = str(input('Place coordinates (east,north): ')).strip('()')
print xy_Pcold
TsPcold_z=gscript.parse_command('r.what', map='LST', coordinates=xy_Pcold)
z_TsPcold=float(dict.keys(TsPcold_z)[0].split('|')[3])
print 'Cold pixel temperature:',z_TsPcold,'K'

print 'Calculating incoming longwave radiation (RLi) - W/m2...'
gscript.mapcalc('RLi=0.85*((-log($Tsw))^0.09)*5.67e-8*$z_TsPcold^4',
```

```

z_TsPcold=z_TsPcold,
Tsw='Tsw',
overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating net radiation flux (Rn) - W/m2...'
gscript.mapcalc('Rn=(1-$aS)*$Rsi+$RLi-$RLo-(1-$e0f)*$RLi',
aS='aS',
RLi='RLi',
RLo='RLo',
Rsi='Rsi',
e0f='e0f',
overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating soil heat flux (G) - W/m2...'
gscript.mapcalc('G_Rn=if(NDVI<0,0.5,((LST-273.15)/
$aS)*(0.0038*$aS+0.0074*$aS^2)*(1-0.98*$NDVI^4))',
aS='aS',
LST='LST',
NDVI='NDVI',
overwrite='true')
gscript.mapcalc('G=$G_Rn*$Rn',
G_Rn='G_Rn',
Rn='Rn',
overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Making the hot píxel mask...'
gscript.mapcalc('Phot=if($NDVI>0.18 && $NDVI<0.3 && $LST>$medianLST,
$LST,null())',
NDVI='NDVI',
aS='aS',
LST='LST',
medianLST=medianLST,

```

```

        overwrite='true')
print 'Choose the hot píxel coordinates in bare soil areas. Use the raster Phot, LST and
RGB_432(LS8_C#) for visualization...'
xy_Phot = str(input('Place coordinates (east,north): ').strip('()'))
print xy_Phot
print 'Done!'
TsPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='LST', coordinates=xy_Phot)
z_TsPhot=float(dict.keys(TsPhot_z)[0].split('|')[3])
print 'Hot píxel temperature:',z_TsPhot,'K'
print 'Calculating friction velocity (u*) for weather station - m/s...'
h=0.15
Zom=0.123*h
u_ast=0.41*u_2m/(math.log(2/Zom))
u_200m=u_ast*(math.log(200/Zom))/0.41
print 'Done!'
print 'Friction velocity', u_ast, 'm/s'
print 'Calculating the momentum roughness length map (Z0map) - m...'
gscript.mapcalc('Z0map=0.018*$LAI',
    LAI='LAI',
    overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating the friction velocity map (u*map) - m/s...'
gscript.mapcalc('u_astmap=0.41*$u_200m/log(200/$Z0map)',
    Z0map='Z0map',
    u_200m=u_200m,
    overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating aerodynamic resistance to heat transport map in terms of neutral stability
(rah) - s/m...'
gscript.mapcalc('rah=log(2/0.1)/($u_astmap*0.41)',
    u_astmap='u_astmap',
    overwrite='true')

```

```

print 'Done!'
GPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='G', coordinates=xy_Phot)
z_GPhot=float(dict.keys(GPhot_z)[0].split('|')[3])
rahPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='rah', coordinates=xy_Phot)
z_rahPhot=float(dict.keys(rahPhot_z)[0].split('|')[3])
RnPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='Rn', coordinates=xy_Phot)
z_RnPhot=float(dict.keys(RnPhot_z)[0].split('|')[3])
print 'Aerodynamic resistance correction, be patient...'
z_rahPhot_i=0
i=1
while (abs(z_rahPhot_i - z_rahPhot) > 0.00001):
    print 'Iteration number:',i
    i = i+1
    z_rahPhot_i=z_rahPhot
    print 'Equation coefficients estimate >> dT = a.LST + b'
    a=(z_RnPhot-z_GPhot)* z_rahPhot_i/((z_TsPhot-z_TsPcold)*1.25*1004)
    b=-a*z_TsPcold
    print 'a:',a, 'b:', b
    print 'Calculating dT map - K...'
    gscript.mapcalc('dT=$a*$LST+$b',
        LST='LST',
        a=a,
        b=b,
        overwrite='true')
    print 'Done!'
    print 'Calculating sensible heat flux (H) - W/m2...'
    gscript.mapcalc('H=($dT/$rah)*1.25*1004',
        dT='dT',
        rah='rah',
        overwrite='true')
    print 'Done!'
    print 'Calculating the Monin-Obukhov length map (L) - m...'

```

```

gscript.mapcalc('L=-((1.25*1004*$LST*$u_astmap^3)/(0.41*9.81*$H)',
    LST='LST',
    u_astmap='u_astmap',
    H='H',
    overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating atmospheric stability correction (L200m, L2m, L01m)...'
gscript.mapcalc('L200m=if($L<0,2*log((1+(1-16*(200/$L))^0.25)/2)+log((1+(1-
16*(200/$L))^0.5)/2)-2*atan((1-16*(200/$L))^0.25)+0.5*3.14159265,if($L>0,-
5*(2/$L),0))',
    L='L',
    overwrite='true')
gscript.mapcalc('L2m=if($L<0,2*log((1+(1-16*(2/$L))^0.5)/2),if($L>0,-5*(2/$L),0))',
    L='L',
    overwrite='true')
gscript.mapcalc('L01m=if($L<0,2*log((1+(1-16*(0.1/$L))^0.5)/2),if($L>0,-
5*(0.1/$L),0))',
    L='L',
    overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating corrected friction velocity map (u*map) - m/s...'
gscript.mapcalc('u_astmap=0.41*$u_200m/(log(200/$Z0map)-$L200m)',
    Z0map='Z0map',
    u_200m='u_200m',
    L200m='L200m',
    overwrite='true')
print 'Done!'
print 'Calculating corrected aerodynamic resistance to heat transport (rah) - s/m...'
gscript.mapcalc('rah=(log(2/0.1)-$L2m+$L01m)/($u_astmap*0.41)',
    u_astmap='u_astmap',
    L2m='L2m',
    L01m='L01m',

```

```

        overwrite='true')
    print 'Done!'
    rahPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='rah', coordinates=xy_Phot)
    z_rahPhot=float(dict.keys(rahPhot_z)[0].split(" ")[3])

    HPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='H', coordinates=xy_Phot)
    z_HPhot=float(dict.keys(HPhot_z)[0].split(" ")[3])
    dTPhot_z=gscript.parse_command('r.what', map='dT', coordinates=xy_Phot)
    z_dTPhot=float(dict.keys(dTPhot_z)[0].split(" ")[3])

    print 'Hot pixel results, verify if Rhhot - Ghot = Hhot'
    print 'Hhot:', z_HPhot,
    print 'rahhot:', z_rahPhot,
    print 'Ghot:', z_GPhot,
    print 'Rnhot:', z_RnPhot, 'dT:', z_dTPhot
    print 'Calculating the latent heat flux (LET) - W/m2...'
    gscript.mapcalc('LET=Rn-G-H',
        H='H',
        Rn='Rn',
        G='G',
        overwrite='true')
    print 'Done!'
    print 'Calculating instantaneous evapotranspiration (ETi) - mm/h...'
    gscript.mapcalc('latent_h=2.501-0.002361*(LST-273.15)',
        LST='LST',
        overwrite='true')
    print 'Done!'
    gscript.mapcalc('ETi=if(3600*(LET/($latent_h*10^6))<0,0,3600*(LET/(2.45*10^6)))',
        LET='LET',
        latent_h='latent_h',
        overwrite='true')
    print 'Done!'

```

```

print 'saving files'
os.chdir(output_path)
gscript.run_command('r.out.gdal',          input='rgb',          output='RGB.tif',
format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal',          input='ETi',          output='ETi.tif',
format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal', input='H', output='H.tif', format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal', input='G', output='G.tif', format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal',          input='Rn',           output='Rn.tif',
format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal',          input='LST',          output='LST.tif',
format='GTiff',overwrite='true')
gscript.run_command('r.out.gdal',          input='NDVI',         output='NDVI.tif',
format='GTiff',overwrite='true')
print 'Done!'

```

ANEXO 6: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



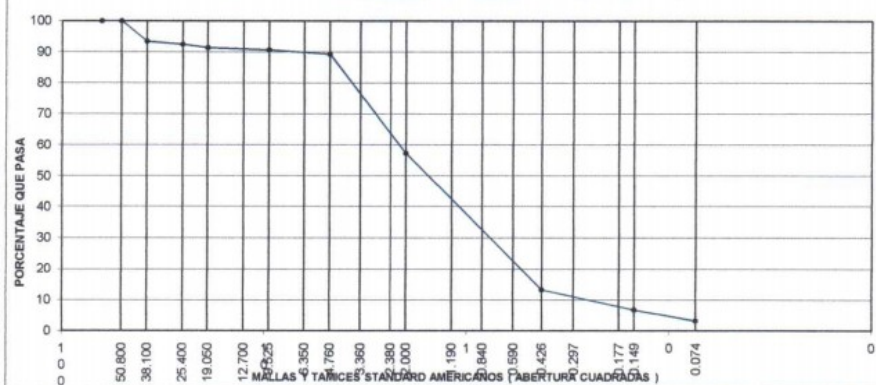
COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

- Estudio de Suelos para Carreteras, Puentes y Edificios ■
- Análisis y Ensayos de Materiales ■
- Diseño y Mezcla de Concretos, Asfalto en Frio y Caliente ■
- Análisis Químicos de Suelos y Agua ■
- Control de Calidad en Obras Civiles en general ■
- Alquiler de Equipos de Laboratorio ■

ANALISIS GRANULOMETRICO

PROYECTO :	TESIS								
UBICACIÓN :	BAJO CURAL (LOTE N° 553 LATERAL N°7 (TERRENOS DE DOÑA LUISA VILLASANTE VALDIVIA)								
SOLICITA :	JONATHAN QUIROZ								
				COLOR CAFÉ		FECHA 10/11/2018			
FRACCIÓN GRUESA	MALLAS	ABERTURA	PESO	%	%	%	ESPECIFIC. % QUE PASA GRADUACION N	DESCRIPCION DE LA MUESTRA SUELO AGRICOLA	
	SERIE	EN	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASANTE			
GRAVA	AMERICANA	M. M.	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASANTE		N° DE CAPA	MI
	3"	0.000						PROFUNDIDAD m.	0
	2 1/2"	63.500						ANALIZADO POR	C. Coaquira E.
	2"	50.800							
	1 1/2"	38.100	172.0	6.5	6.5	100.0			
	1"	25.400	26.0	1.0	7.5	92.5		PESO ORIGINAL :	2628
	3/4"	19.050	30.0	1.1	8.7	91.3		< N°4 Grs. FINOS :	2346
	1/2"	12.700	12.0	0.5	9.1	90.9		> N°4 Grs. GRAVA :	282
	3/8"	9.525	7.0	0.3	9.4	90.6		< N°4 CUARTEADO SECO :	537.2
	1/4"	6.350	19.0	0.7	10.1	89.9		< N°4 LAVADO SECO :	518.2
	N° 4	4.760	16.0	0.6	10.7	89.3		PERDIDA DEL LAVADO :	19.0
	N° 6								
ARENA	N° 8	2.380						HUMEDAD NATURAL	13.44
	N° 10	2.000	12.4	32.0	42.7	57.3		LIMITE LIQUIDO (%)	0.0%
	N°16	1.190						LIMITE PLASTICO (%)	NP
	N° 20	0.840	28.1	20.7	63.4	36.6		INDICE PLASTICO (%)	NP
	N° 30	0.590						CLASIFICACION SUCS	SP
	N° 40	0.426	54.9	23.4	86.8	13.2		CLASIFICACION AASHTO	A-1-b (0)
	N° 50	0.297						D ₁₀	0.35
	N° 80	0.177						D ₃₀	0.81
	N° 100	0.149	162.1	6.5	93.3	6.7		D ₆₀	2.25
	N° 200	0.074	87.6	3.6	96.8	3.2		C _u =	6.44
-N° 200	-	19.0	3.2	100.0	-		C _c =	0.83	

GRAFICO DE GRADUACION DE LOS AGREGADOS



ANEXO 7: ANÁLISIS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA



COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

- Estudio de Suelos para Carreteras, Puentes y Edificios ■
- Análisis y Ensayos de Materiales ■
- Diseño y Mezcla de Concretos, Asfalto en Frio y Caliente ■
- Análisis Químicos de Suelos y Agua ■
- Control de Calidad en Obras Civiles en general ■
- Alquiler de Equipos de Laboratorio ■

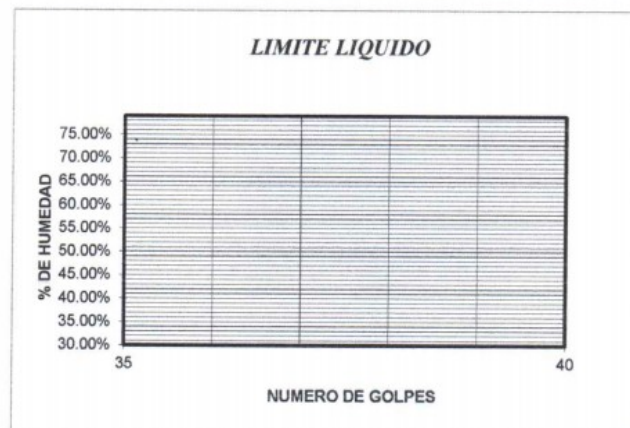
LIMITES DE CONSISTENCIA

ASTM D-4318

PROYECTO : TESIS
 UBICACIÓN : BAJO CURAL (LOTE N° 553 LATERAL N°7 (TERRENOS DE DOÑA LUISA VILLASANTE VALDIVIA)
 SOLICITA : JONATAN QUIROZ
 MATERIAL : SUELO AGRICOLA
 I MI

FECHA : 11/11/2018
 HECHO POR: C. Coaquira E.

	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO
RECIPIENTE N° :		
R + S HUMEDO:		
R + S SECO:		
PESO DEL AGUA:	N.P.	N.P.
PESO DEL RECIPIENTE:		
PESO DEL S. SECO:		
% DE HUMEDAD:		
N° DE GOLPES		



L. Liquido	
L. Plástico	N.P.
I. Plasticidad	

* NOTA: SI LIMITE PLASTICO = (0) ENTONCES LIMITE PLASTICO = N.P.

COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

Carlos A. Coaquira Esquicha
Téc. Laboratorio de Suelos

COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

César Abel Aquino Choque
ING CIVIL - CIP 64642

URB. NUEVO PERU MZ. "O" LT.- 7 DISTRITO DE PAUCARPATA - AREQUIPA RUC: 20603264615
 TELEF. 054 466587 CEL. RPC 959293918 – 959128655 Correo a coaquira_cace@hotmail.com

ANEXO 8: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE HUMEDAD Y MATERIA ORGÁNICA



COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

- Estudio de Suelos para Carreteras, Puentes y Edificios ■
- Análisis y Ensayos de Materiales ■
- Diseño y Mezcla de Concretos, Asfalto en Frio y Caliente ■
- Análisis Químicos de Suelos y Agua ■
- Control de Calidad en Obras Civiles en general ■
- Alquiler de Equipos de Laboratorio ■

**METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD, DE
CENIZAS Y LA MATERIA ORGANICA DE UNA TURBA Y OTROS SUELOS**
AASHTO T 267 (MTCE 118-2000)

PROYECTO : TESIS
SOLICITANTE : JONATHAN QUIROZ
CANTERA : BAJO CURAL (LOTE N° 553 LATERAL N°7 (TERRENOS DE
DOÑA LUISA VILLASANTE VALDIVIA)
MATERIAL : SUELO AGRICOLA
12/11/2018
ECHO POR :
C.COAQUIRA.E

DETERMINACION DE LA HUMEDAD

EN HORNO 110±5 C°

RECIPIENTE N°:	I	II
Peso suelo humedo + Crisoles	257.5	267.3
Peso suelo seco + Crisoles	227	235.4
Peso del agua	30.5	31.9
Peso del Crisol	0	0
Peso del suelo seco	227	235.4
% de humedad natural	13.44	13.55

IGNICION DEL SUELO

EN MUFLA 445±10 C°

RECIPIENTE N°:	III	IV
CRISOL + MUESTRA ANTES DE IGNICION	72.2	70.22
CRISOL + MUESTRA DESPUES DE IGNICION	71.13	69.18
PESO DE LA CENIZA	1.07	1.04
PESO DEL CRISOL	52.19	50.22
PESO MUESTRA DESPUES DE IGNICION	18.94	18.96
% DE MATERIAL ORGANICO	5.6	5.5
PROMEDIO % DE MATERIAL ORGANICO	5.57	

CLASIFICACION DEL SUELO	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA
SELECCIONADO	< 0.2 %
ADECUADO	< 1.0 %
TOLERABLE	< 2.0 %
MARGINAL	< 5.0 %
INADECUADO	> 5.0 %

COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

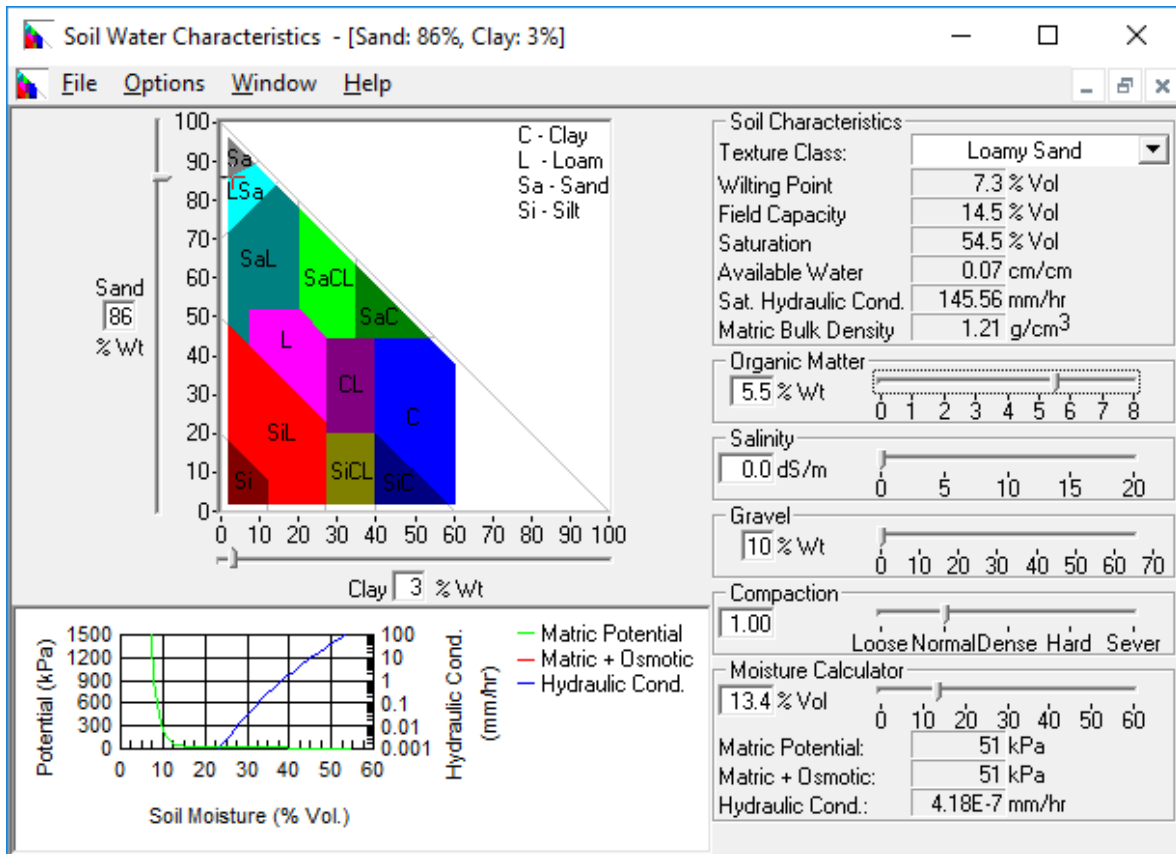
Carlos A. Coaquira Esquicha
Tec. Laboratorio de Suelos
Concreto y Asfalto

COAQUIRA Hnos.
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ASFALTO

César Abel Aquino Choque
ING. CIVIL - CIP 04642

URB. NUEVO PERU MZ. "O" LT.- 7 DISTRITO DE PAUCARPATA - AREQUIPA RUC: 20603264615
TELEF. 054 466587 CEL. RPC 959293918 - 959128655 Correo a coaquira cace@hotmail.com

**ANEXO 9: RESULTADO DE LOS PARÁMETROS DE SUELO CALCULADOS
MEDIANTE LAS ECUACIONES DE SAXTON-RAWLS**



ANEXO 10: FORMATO DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS

ENCUESTA SOBRE CULTIVOS PRESENTES EN LA IRRIGACIÓN BAJO CURAL																
Junta de Usuarios:	Junta de Usuarios Chali Zona Regalada			Comisión de Regantes	Bajo Cural											
Canal de Derivación:	Bajo Cural	Canal Lateral de Riego:		Año Agrícola:	2018 - 2019											
Área Irrigada:		Número de Lote:		Tipo Riego:												
Coordenadas UTM	WGS 84 Zona 19S				m Este			m Sur								
Cultivo - Variedad	Tiempo e Intervalo de Riego (horas/ días)	Fecha Siembra - Cosecha			Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abri	May	Jun	Jul
Nombre y Apellidos:											Firma:					
DNI:																

ANEXO 11: LÍNEAS DE COMANDO PARA PROCESAR LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE CULTIVO CON PENMAN-MONTEITH, EJEMPLO DEL CULTIVO “AJO”

NecesidadesHidricasPM

March 18, 2019

```
In [1]: ## import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import datetime
from scipy.interpolate import interp1d
import calendar
import pandas as pd
```

0.1 Cultivos

```
In [2]: Ajo = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':17,'Development':27, 'MidSeason':47,'LateSeason':30},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.9,'LateSeason':
'ProfundidadRaices':{'0':0.1,'Initial':'Interpolate','Development':0.2,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.4,'Development':'Interpolate','MidSea:
```

0.2 Definiciones de Tiempo

```
In [3]: #Variables de tiempo
TimeInitial = Ajo['stage']['Initial']
TimeDevelopment = Ajo['stage']['Initial']+Ajo['stage']['Development']
TimeMidSeason =Ajo['stage']['Initial']+Ajo['stage']['Development']+Ajo['stage']['MidSe:
TimeLateSeason =Ajo['stage']['Initial']+Ajo['stage']['Development']+Ajo['stage']['MidS:
TimeLateSeason, TimeMidSeason, TimeDevelopment, TimeInitial
```

```
Out[3]: (121, 91, 44, 17)
```

0.3 Array en días

```
In [4]: #Array de días
Inicio = np.datetime64(Ajo['FechaSiembra'])
Initial = np.arange(Inicio, Inicio + Ajo['stage']['Initial'])
Development = np.arange(Initial[-1]+1, Initial[-1]+1 + Ajo['stage']['Development'])
MidSeason = np.arange(Development[-1]+1, Development[-1]+1 + Ajo['stage']['MidSeason'])
LateSeason = np.arange(MidSeason[-1]+1, MidSeason[-1]+1 + Ajo['stage']['LateSeason'])

Days = np.concatenate((Initial, Development,MidSeason,LateSeason))
```

1

0.4 Array de Stages

```
In [5]: #Array de Stages
Stages = np.concatenate((np.array(["Initial"]*Ajo['stage']['Initial']),
                           np.array(["Development"]*Ajo['stage']['Development']),
                           np.array(["MidSeason"]*Ajo['stage']['MidSeason']),
                           np.array(["LateSeason"]*Ajo['stage']['LateSeason'])))
```

0.5 Interpolate Values

```
In [6]: #Interpolation of kc value
x = np.array((1,TimeInitial,TimeDevelopment,TimeMidSeason,TimeLateSeason))
y = np.array((Ajo['kc']['Initial'], Ajo['kc']['Initial'],Ajo['kc']['MidSeason'],Ajo['k
f = interp1d(x, y, kind='linear')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
kc = f(range)
plt.plot(range,kc)
```

```
In [7]: #Interpolation of RootsDpeth
x = np.array((1,TimeDevelopment,TimeMidSeason,TimeLateSeason))
y = np.array((Ajo['ProfundidadRaices']['0'], Ajo['ProfundidadRaices']['Development'],A
f = interp1d(x, y, kind='linear')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
RootDepth = f(range)
plt.plot(range,RootDepth)
```

```
In [8]: #Interpolation of DepletionFrac
x = np.array((1,TimeInitial,TimeMidSeason,TimeLateSeason))
y = np.array((Ajo['FraccionAgotamientoCritico']['Initial'], Ajo['FraccionAgotamientoCr
f = interp1d(x, y, kind='linear')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
DepletFrac = f(range)
plt.plot(range,DepletFrac)
```

0.6 TAW & RAW

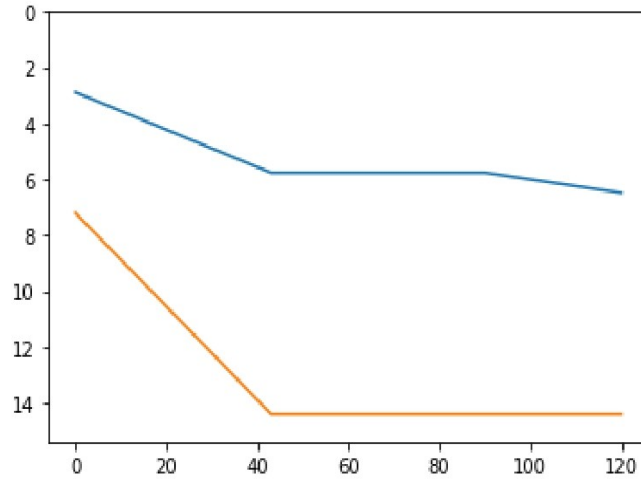
```
In [9]: ## ADT & AFA, Agua disponible total y agua facilmente aprovechable
## TAW & RAW, total available water and readily available water

WP = 7.3/100 #m3/m3 wilting point
FC = 14.5/100 #m3/m3 field capacity

TAW = 1000*(FC-WP)* RootDepth #Total Available Water in mm
RAW = DepletFrac * TAW # Readily available water in mmm

plt.ylim(max(TAW)+1, 0)
plt.plot(np.arange(Days.shape[0]),RAW, np.arange(Days.shape[0]),TAW)

Out[9]: [<matplotlib.lines.Line2D at 0x24bb522e668>,
         <matplotlib.lines.Line2D at 0x24bb550dda0>]
```



0.7 Read PP & ET data

```
In [10]: #Filtrando meses de cultivos
os.chdir("C:\\Users\\Jonathan\\Desktop\\TESIS\\12_Excels")
PP_ET = pd.read_excel("PP_ET_Huasacache.xlsx", index_col=0)
os.chdir("C:\\Users\\Jonathan\\Desktop\\TESIS\\18_Scripts")
```

0.8 Daily pp and et values

```
In [11]: PP = np.asarray(PP_ET['Precipitación (mm/mes)'])
ET = np.asarray(PP_ET['ET (mm/día)'])
pp = []
et = []
for i in np.arange(PP_ET.shape[0]):
    pp.append([PP[i]/calendar.monthrange(PP_ET.index[i].year,PP_ET.index[i].month)[1]
    et.append([ET[i]*calendar.monthrange(PP_ET.index[i].year,PP_ET.index[i].month)[1]
pp = np.asarray([item for sublist in pp for item in sublist])
et = np.asarray([item for sublist in et for item in sublist])

DiasSiembra = (Ajo['FechaSiembra'] - datetime.date(PP_ET.index[0].year,PP_ET.index[0]
DiasCosecha = DiasSiembra + TimeLateSeason
pp = pp[DiasSiembra:DiasCosecha]
et = et[DiasSiembra:DiasCosecha]
```

0.8.1 Effective Precipitation

```
In [12]: Values = pd.DataFrame({'Days':Days,'Kc':kc,"ET":et,"PP":pp,"RAW":RAW}) #Create Datafr
Values = Values.set_index('Days') #Setting Index
Values['ETc'] = pd.Series(Values['ET']*Values['Kc'], index=Values.index) #Add ETc
Values['Month'] = pd.Series(np.asarray(Values.index, dtype='datetime64[M]'), index=Va

#Groupby
BaseEffPP = Values.groupby('Month').mean() #, as_index = False
BaseEffPP.index = pd.to_datetime(BaseEffPP.index, format='%Y/%m')

#To Inches
BaseEffPP['PP_pulg'] = pd.Series(BaseEffPP['PP']/25.4, index=BaseEffPP.index) #PP in
BaseEffPP['ETc_pulg'] = pd.Series(BaseEffPP['ETc']/25.4, index=BaseEffPP.index) # ET
BaseEffPP['D'] = pd.Series(BaseEffPP['RAW']/25.4, index=BaseEffPP.index) # RAW in inc.

#Soil Water Storage Factor (SF)
BaseEffPP['SF'] = pd.Series((0.531747 + 0.295164*BaseEffPP['D'] - 0.057697*BaseEffPP[
BaseEffPP['Eff_pp'] = pd.Series(BaseEffPP['SF'] *(0.70917*BaseEffPP['PP_pulg']**0.824

#Correcting Eff_pp negative values
BaseEffPP.loc[BaseEffPP['Eff_pp'] < 0, 'Eff_pp'] = 0

In [13]: #Converting to daily array values
Fechas = pd.DataFrame({'Days':Days}) #Create Dataframe
Fechas['Month'] = pd.Series(np.asarray(Fechas['Days'], dtype='datetime64[M]'), index=
FechasCount = Fechas.groupby('Month').count()
FechasCount['Days'][0]

EFF_PP = np.asarray(BaseEffPP['Eff_pp']) * 25.4#To mm from inches
eff_pp = []
for i in np.arange(BaseEffPP.shape[0]):
    eff_pp.append([EFF_PP[i]/calendar.monthrange(BaseEffPP.index[i].year,BaseEffPP.in
eff_pp = np.asarray([item for sublist in eff_pp for item in sublist])
```

0.9 Crop Water Requirements

```
In [14]: CWR_Ajo = pd.DataFrame({'Days':Days,'Stages':Stages,'Kc':kc,"eff_pp":eff_pp,'ET':et,'
CWR_Ajo.set_index('Days', inplace=True)
CWR_Ajo['CWR'] = pd.Series(CWR_Ajo['et_c']-CWR_Ajo['eff_pp'], index=CWR_Ajo.index)

In [15]: fontTitle = {'family': 'serif','color': 'black','weight': 'bold','size': 14}
fontAxis = {'family': 'serif','color': 'black','weight': 'bold','size': 11,}

In [16]: Dri_0 = 1000*(FC-WP)*RootDepth[0] #FC = 0.145, WP= 0.073, Dri_0=7.2

Dri = []
```

```

I = []

for fio in np.arange(CWR_Ajo['ET'].shape[0]):
    if fio == 0:
        Dri.append(Dri_0)
        I.append(0)
    elif fio == CWR_Ajo['ET'].shape[0]-1:
        if Dri[fio-1]+CWR_Ajo['et_c'][fio] > RAW[fio]:
            I.append(Dri[-1]+CWR_Ajo['et_c'][fio])
        else:
            I.append(0)
        Dri.append(Dri[-1]-CWR_Ajo['eff_pp'][fio]-I[-1]+CWR_Ajo['et_c'][fio])
    else:
        if fio < CWR_Ajo['ET'].shape[0]:
            Dri_f = Dri[-1]-CWR_Ajo['eff_pp'][fio+1]-I[-1]+CWR_Ajo['et_c'][fio+1]
        if Dri_f >= RAW[fio]:
            I.append(Dri_f)
        else:
            I.append(0)
        Dri.append(Dri[-1]-CWR_Ajo['eff_pp'][fio]-I[-1]+CWR_Ajo['et_c'][fio])

plt.figure(figsize=(10,5))
plt.ylim(max(TAW)+2, -2)
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,RAW, '--',label="AFA", color = '#6a2c70') #Plot RA
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,TAW, '--', label="ADT",color = '#f08a5d') # PLOT T
plt.plot((1,RAW.shape[0]),(0,0), '--', label="CC",color = '#b83b5e') #Plot FC
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,Dri, label="Agotamiento", color='#2f89fc') # PLOT
#plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,I, label="I") # PLOT TAW

plt.title("Programación de riego para el cultivo de Ajo", fontdict=fontTitle)
plt.xlabel('Días', fontdict=fontAxis)
plt.ylabel('Retención de Agua del Suelo (mm)', fontdict=fontAxis)
plt.legend()
plt.savefig('CWR/ProgramacionRiego_Ajo',bbox_inches='tight')
plt.show()

#Dri[0:5], I[0:5], RAW[0:5], CWR_Ajo['et_c'][0:5]

```

ANEXO 12: LÍNEAS DE COMANDO PARA PROCESAR LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE CULTIVO CON SEBAL, EJEMPLO DEL CULTIVO “MAIZ AMILACEO 1”

NecesidadesHidricasSEBAL

March 18, 2019

```
In [413]: ## import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import datetime
from scipy.interpolate import interp1d
import calendar
import pandas as pd
```

0.1 Cultivos

```
In [414]: MaizAmilaceo1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
    'stage': {'Initial':31,'Development':31, 'MidSeason':43,'LateSeason':55},
    'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5},
    'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate'},
    'ETSEBAL':{'20180314':2.76654,'20180415':2.20528,'20180517':2.92679,
```

0.2 Definiciones de Tiempo

```
In [415]: #Variables de tiempo
TimeInitial = MaizAmilaceo1['stage']['Initial']
TimeDevelopment = MaizAmilaceo1['stage']['Initial']+MaizAmilaceo1['stage']['Development']
TimeMidSeason =MaizAmilaceo1['stage']['Initial']+MaizAmilaceo1['stage']['Development']
TimeLateSeason =MaizAmilaceo1['stage']['Initial']+MaizAmilaceo1['stage']['Development']
TimeLateSeason, TimeMidSeason, TimeDevelopment, TimeInitial
```

```
Out[415]: (120, 105, 62, 31)
```

0.3 Array en días

```
In [416]: #Array de días
Inicio = np.datetime64(MaizAmilaceo1['FechaSiembra'])
Initial = np.arange(Inicio, Inicio + MaizAmilaceo1['stage']['Initial'])
Development = np.arange(Initial[-1]+1, Initial[-1]+1 + MaizAmilaceo1['stage']['Development'])
MidSeason = np.arange(Development[-1]+1, Development[-1]+1 + MaizAmilaceo1['stage']['Development'])
LateSeason = np.arange(MidSeason[-1]+1, MidSeason[-1]+1 + MaizAmilaceo1['stage']['LateSeason'])

Days = np.concatenate((Initial, Development,MidSeason,LateSeason))
```

1

0.4 Array de Stages

```
In [417]: #Array de Stages
Stages = np.concatenate((np.array(["Initial"]*MaizAmilaceo1['stage']['Initial']),
                           np.array(["Development"]*MaizAmilaceo1['stage']['Development'],
                           np.array(["MidSeason"]*MaizAmilaceo1['stage']['MidSeason']),
                           np.array(["LateSeason"]*MaizAmilaceo1['stage']['LateSeason']])
```

0.5 Interpolate Values

```
In [418]: #Interpolation of RootsDpeth
x = np.array((1,TimeDevelopment,TimeMidSeason,TimeLateSeason))
y = np.array((MaizAmilaceo1['ProfundidadRaices']['0'], MaizAmilaceo1['ProfundidadRaices']['1'],
              MaizAmilaceo1['ProfundidadRaices']['2'], MaizAmilaceo1['ProfundidadRaices']['3']))
f = interp1d(x, y, kind='linear')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
RootDepth = f(range)
plt.plot(range,RootDepth)
```

```
In [419]: #Interpolation of DepletionFrac
x = np.array((1,TimeInitial,TimeMidSeason,TimeLateSeason))
y = np.array((MaizAmilaceo1['FraccionAgotamientoCritico']['Initial'], MaizAmilaceo1['FraccionAgotamientoCritico']['1'],
              MaizAmilaceo1['FraccionAgotamientoCritico']['2'], MaizAmilaceo1['FraccionAgotamientoCritico']['3']))
f = interp1d(x, y, kind='linear')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
DepletFrac = f(range)
plt.plot(range,DepletFrac)
```

```
In [420]: #Interpolation SEBAL evapotranspiration

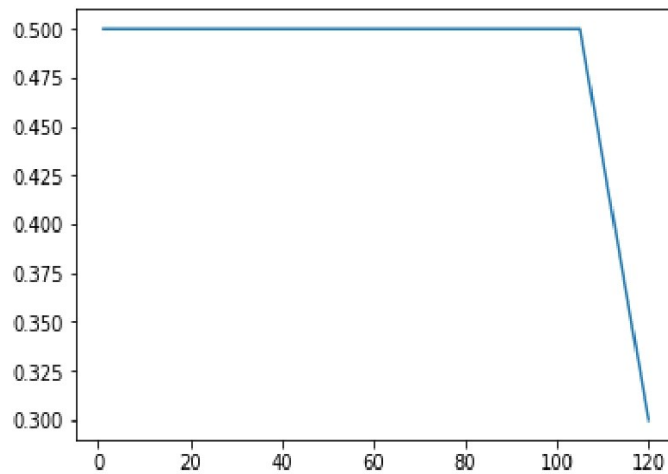
Seb = []
for i in np.arange(0,len(MaizAmilaceo1['ETSEBAL'])):
    time = datetime.datetime.strptime(list(MaizAmilaceo1['ETSEBAL'].keys())[i], '%Y/%m/%d')
    Seb.append(time)

index_days = []
for q in np.arange(0,len(Seb)):
    if q == 0:
        index_days.append(1)
    elif q == len(Seb)-1:
        index_days.append(TimeLateSeason)
    else:
        for w in np.arange(len(Days)):
            if Days[w] == np.datetime64(datetime.date(Seb[q].year,Seb[q].month,Seb[q].day)):
                index_days.append(w)
index_days = np.array(index_days)
Sebal_values = np.array(list(MaizAmilaceo1['ETSEBAL'].values()))

#f = interp1d(index_days, Sebal_values, kind='quadratic')
range = np.arange(1,TimeLateSeason+1)
ET_SEBAL = f(range)
```

```
plt.plot(range,ET_SEBAL)
#ET_SEBAL
```

Out[420]: [



In [421]: np.datetime64(datetime.date(2017,8,15))+ 120

Out[421]: numpy.datetime64('2017-12-13')

0.6 TAW & RAW

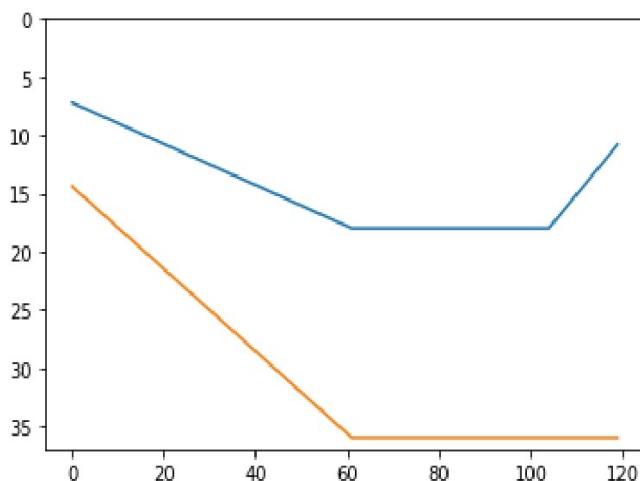
In [422]: *## ADT & AFA, Agua disponible total y agua facilmente aprovechable*
TAW & RAW, total available water and readily available water

```
WP = 7.3/100 #m3/m3 wilting point
FC = 14.5/100 #m3/m3 field capacity
```

```
TAW = 1000*(FC-WP)* RootDepth #Total Available Water in mm
RAW = DepletFrac * TAW # Readily available water in mmm
```

```
plt.ylim(max(TAW)+1, 0)
plt.plot(np.arange(Days.shape[0]),RAW, np.arange(Days.shape[0]),TAW)
```

Out[422]: [<matplotlib.lines.Line2D at 0x12718fda1d0>]



0.7 Read PP

```
In [423]: #Filtrando meses de cultivos
os.chdir("C:\\Users\\Jonathan\\Desktop\\TESIS\\12_Excels")
PP_ET = pd.read_excel("PP_ET_Huasacache.xlsx", index_col=0)
os.chdir("C:\\Users\\Jonathan\\Desktop\\TESIS\\18_Scripts")
```

0.8 Daily pp and et values

```
In [424]: PP = np.asarray(PP_ET['Precipitación (mm/mes)'])
pp = []
for i in np.arange(PP_ET.shape[0]):
    pp.append([PP[i]/calendar.monthrange(PP_ET.index[i].year, PP_ET.index[i].month)[1]:
    pp = np.asarray([item for sublist in pp for item in sublist])

DiasSiembra = (MaizAmilaceo1['FechaSiembra'] - datetime.date(PP_ET.index[0].year, PP_
DiasCosecha = DiasSiembra + TimeLateSeason
pp = pp[DiasSiembra:DiasCosecha]
```

0.8.1 Effective Precipitation

```
In [425]: Values = pd.DataFrame({'Days':Days, "PP":pp, "ETa":ET_SEBAL, "RAW":RAW}) #Create Datafr
Values = Values.set_index('Days') #Setting Index

Values['Month'] = pd.Series(np.asarray(Values.index, dtype='datetime64[M]'), index=V:
```

```

#Groupby
BaseEffPP = Values.groupby('Month').mean() #, as_index = False
BaseEffPP.index = pd.to_datetime(BaseEffPP.index, format='%Y/%m')

#To Inches
BaseEffPP['PP_pulg'] = pd.Series(BaseEffPP['PP']/25.4, index=BaseEffPP.index) #PP in
BaseEffPP['ETa_pulg'] = pd.Series(BaseEffPP['ETa']/25.4, index=BaseEffPP.index) # ET
BaseEffPP['D'] = pd.Series(BaseEffPP['RAW']/25.4, index=BaseEffPP.index) # RAW in in

#Soil Water Storage Factor (SF)
BaseEffPP['SF'] = pd.Series((0.531747 + 0.295164*BaseEffPP['D'] - 0.057697*BaseEffPP
BaseEffPP['Eff_pp'] = pd.Series(BaseEffPP['SF'] *(0.70917*BaseEffPP['PP_pulg']**0.82

#Correcting Eff_pp negative values
BaseEffPP.loc[BaseEffPP['Eff_pp'] < 0, 'Eff_pp'] = 0

In [426]: #Converting to daily array values
Fechas = pd.DataFrame({'Days':Days}) #Create Dataframe
Fechas['Month'] = pd.Series(np.asarray(Fechas['Days'], dtype='datetime64[M]'), index=
FechasCount = Fechas.groupby('Month').count()
FechasCount['Days'][0]

EFF_PP = np.asarray(BaseEffPP['Eff_pp']) * 25.4#To mm from inches
eff_pp = []
for i in np.arange(BaseEffPP.shape[0]):
    eff_pp.append([EFF_PP[i]/calendar.monthrange(BaseEffPP.index[i].year,BaseEffPP.i
eff_pp = np.asarray([item for sublist in eff_pp for item in sublist])

```

0.9 Crop Water Requirements

```

In [427]: CWR_MaizAmilaceo1 = pd.DataFrame({'Days':Days,'Stages':Stages,"eff_pp":eff_pp,'ETa':!
CWR_MaizAmilaceo1.set_index('Days', inplace=True)
CWR_MaizAmilaceo1['CWR'] = pd.Series(CWR_MaizAmilaceo1['ETa']-CWR_MaizAmilaceo1['eff

In [428]: fontTitle = {'family': 'serif','color': 'black','weight': 'bold','size': 14}
fontAxis = {'family': 'serif','color': 'black','weight': 'bold','size': 11,}

In [429]: Dri_0 = 1000*(FC-WP)*RootDepth[0] #FC = 0.145, WP= 0.073, Dri_0=7.2

Dri = []
I = []

for fio in np.arange(CWR_MaizAmilaceo1['ETa'].shape[0]):
    if fio == 0:
        Dri.append(Dri_0)
        I.append(0)
    elif fio == CWR_MaizAmilaceo1['ETa'].shape[0]-1:

```

```

if Dri[fio-1]+CWR_MaizAmilaceo1['ETa'][fio] > RAW[fio]:
    I.append(Dri[-1]+CWR_MaizAmilaceo1['ETa'][fio])
else:
    I.append(0)
Dri.append(Dri[-1]-CWR_MaizAmilaceo1['eff_pp'][fio]-I[-1]+CWR_MaizAmilaceo1[
else:
if fio < CWR_MaizAmilaceo1['ETa'].shape[0]:
    Dri_f = Dri[-1]-CWR_MaizAmilaceo1['eff_pp'][fio+1]-I[-1]+CWR_MaizAmilaceo1
if Dri_f >= RAW[fio]:
    I.append(Dri_f)
else:
    I.append(0)
Dri.append(Dri[-1]-CWR_MaizAmilaceo1['eff_pp'][fio]-I[-1]+CWR_MaizAmilaceo1[

plt.figure(figsize=(10,5))
plt.ylim(max(TAW)+2, -2)
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,RAW, '--',label="AFA", color = '#6a2c70') #Plot R
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,TAW, '--', label="ADT",color = '#f08a5d') # PLOT
plt.plot((1,RAW.shape[0]),(0,0), '--', label="CC",color = '#b83b5e') #Plot FC
plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,Dri, label="Agotamiento", color='#2f89fc') # PLOT
#plt.plot(np.arange(RAW.shape[0])+1,I, label="I") # PLOT TAW

plt.title("Programación de riego para el cultivo de MaizAmilaceo1 con \n datos de E
plt.xlabel('Días', fontdict=fontAxis)
plt.ylabel('Retención de Agua del Suelo (mm)', fontdict=fontAxis)
plt.legend()
plt.savefig('CWR_SEBAL/ProgramacionRiego_SEBAL_MaizAmilaceo1',bbox_inches='tight')
plt.show()

#Dri[0:10], I[0:5], RAW[0:5]#, CWR_MaizAmilaceo1['et_c'][0:5]

```

ANEXO 13: HOJA DE CÁLCULO CON EL PROCESAMIENTO DE PENMAN
MONTEITH DIARIO

Fechas	DOY	LAI	LAIactive	r _s	d	z _{om}	z _{oh}	r _a	P	Y	eo(Tmin)	eo(Tmax)	eo(Tmed)	eo(TBt)
05/2017	227.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	2.87	1.67	1.16
09/2017	238.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	3.02	1.87	1.29
10/2017	288.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	3.03	1.83	1.29
11/2017	319.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	71.61	77.86	0.05	2.93	1.83	1.32
12/2017	349.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	74.17	77.86	0.05	2.83	1.87	1.47
01/2018	45.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	66.99	77.86	0.05	2.75	1.92	1.56
02/2018	46.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	63.93	77.86	0.05	2.60	1.85	1.63
03/2018	74.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	74.17	77.86	0.05	2.85	1.94	1.64
04/2018	105.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	2.71	1.78	1.54
05/2018	135.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	2.79	1.69	1.37
06/2018	166.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	2.84	1.75	1.26
07/2018	196.00	2.88	1.44	69.44	0.08	0.01	0.01	0.00	69.69	77.86	0.05	2.76	1.71	1.24

es	Δt	ea	et	es	ω	Ra	N	Rb	Rms	Reo	Rnl	Rn	G	ET (mm/día)
1.91	0.11	0.64	0.96	0.24	1.54	12.35	38.14	12.35	21.91	16.87	30.28	4.84	12.03	0.00
2.07	0.12	0.80	0.99	0.04	1.58	36.32	36.32	12.08	21.31	16.41	28.84	4.82	11.59	0.00
2.05	0.12	0.85	1.01	-0.17	1.52	33.03	33.03	11.61	20.71	15.95	26.22	5.22	10.73	0.00
2.02	0.12	0.93	1.02	-0.33	1.47	29.39	29.39	11.21	18.78	14.46	23.34	5.21	9.25	0.00
2.02	0.12	1.22	1.03	-0.41	1.44	27.59	27.59	11.02	18.38	14.15	21.91	5.02	9.12	0.00
2.02	0.12	1.25	1.03	-0.37	1.46	28.66	28.66	11.12	18.88	14.54	22.76	4.90	9.63	0.00
1.96	0.12	1.42	1.02	-0.23	1.50	32.09	32.09	11.47	19.34	14.81	25.48	4.00	10.81	0.00
2.07	0.12	1.35	1.01	-0.05	1.56	35.56	35.56	11.89	21.73	16.73	28.23	4.25	12.48	0.00
1.93	0.11	1.26	0.99	0.17	1.52	38.06	38.06	12.38	21.79	16.77	30.22	3.91	12.86	0.00
1.90	0.11	0.97	0.98	0.33	1.67	38.79	38.79	12.77	21.79	16.78	30.80	4.15	12.63	0.00
1.97	0.11	0.81	0.97	0.41	1.70	38.72	38.72	12.97	20.98	16.15	30.75	4.19	11.96	0.00
1.91	0.11	0.79	0.97	0.37	1.69	38.61	38.61	12.89	21.55	16.59	30.66	4.40	12.19	0.00

ANEXO 14: HOJA DE CÁLCULO CON EL PROCESAMIENTO DE PENMAN
MONTEITH HORARIO

Fechas	DOY	eo(T13)	eo(TBH)	D	P	Y	es	ea	ψ	dr	d2	b	Sc	Lz
08/2017		217.00	2.87	0.93	0.17	77.86	0.05	2.87	0.41	0.29	0.98	0.24	2.52	-0.07
09/2017		258.00	3.02	1.12	0.18	77.86	0.05	3.02	0.63	0.29	0.99	0.04	3.06	0.09
10/2017		288.00	3.03	1.13	0.18	77.86	0.05	3.03	0.68	0.29	1.01	-0.17	3.57	0.25
11/2017		319.00	2.93	1.20	0.18	77.86	0.05	2.93	0.81	0.29	1.02	-0.33	4.11	0.25
12/2017		349.00	2.83	1.35	0.17	77.86	0.05	2.83	1.10	0.29	1.03	-0.41	4.63	0.06
01/2018		15.00	2.75	1.42	0.17	77.86	0.05	2.75	1.11	0.29	1.03	-0.37	-1.14	-0.15
02/2018		46.00	2.60	1.48	0.16	77.86	0.05	2.60	1.28	0.29	1.02	-0.23	-0.60	-0.24
03/2018		74.00	2.85	1.44	0.17	77.86	0.05	2.85	1.15	0.29	1.01	-0.05	-0.12	-0.16
04/2018		105.00	2.71	1.32	0.16	77.86	0.05	2.71	1.03	0.29	0.99	0.17	0.41	0.00
05/2018		135.00	2.79	1.08	0.17	77.86	0.05	2.79	0.69	0.29	0.98	0.33	0.93	0.06
06/2018		166.00	2.84	1.03	0.17	77.86	0.05	2.84	0.59	0.29	0.97	0.41	1.47	0.00
07/2018		196.00	2.76	1.02	0.17	77.86	0.05	2.76	0.56	0.29	0.97	0.37	1.99	-0.09

Lm	t	w	ws	w1	Condicional	w2	Ra	Rs	Rso	Rns	Rnl	Rn	G	ET (mm/hora)
	71.56	12.50	-0.09	1.64	1.00	-0.22	0.04	4.77	4.77	3.79	3.67	0.29	3.38	0.34
	71.56	12.50	-0.05	1.58	1.00	-0.18	0.08	4.71	4.71	3.74	3.62	0.27	3.36	0.34
	71.56	12.50	-0.01	1.52	1.00	-0.14	0.13	4.44	4.44	3.52	3.42	0.26	3.16	0.32
	71.56	12.50	-0.01	1.47	1.00	-0.14	0.12	4.08	4.08	3.24	3.14	0.25	2.89	0.29
	71.56	12.50	-0.05	1.44	1.00	-0.19	0.08	3.88	3.88	3.08	2.99	0.22	2.77	0.28
	71.56	12.50	-0.11	1.46	1.00	-0.24	0.02	3.98	3.98	3.16	3.06	0.22	2.84	0.28
	71.56	12.50	-0.13	1.50	1.00	-0.27	0.00	4.32	4.32	3.43	3.33	0.20	3.12	0.31
	71.56	12.50	-0.11	1.56	1.00	-0.24	0.02	4.65	4.65	3.69	3.58	0.22	3.36	0.34
	71.56	12.50	-0.07	1.62	1.00	-0.20	0.06	4.82	4.82	3.83	3.71	0.23	3.49	0.35
	71.56	12.50	-0.05	1.67	1.00	-0.19	0.08	4.79	4.79	3.80	3.69	0.26	3.43	0.34
	71.56	12.50	-0.07	1.70	1.00	-0.20	0.06	4.71	4.71	3.74	3.62	0.27	3.36	0.34
	71.56	12.50	-0.10	1.69	1.00	-0.23	0.04	4.71	4.71	3.74	3.63	0.27	3.36	0.34

ANEXO 15: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS CON POSTGRESQL

psycopg2

April 2, 2019

```
In [20]: import psycopg2
import pandas as pd
import numpy as np
from osgeo import ogr
import matplotlib.pyplot as plt
```

0.1 Creando base de datos

```
In [2]: from psycopg2.extensions import ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT

conn = psycopg2.connect(dbname='postgres',user='postgres', host='localhost',password='')
conn.set_isolation_level(ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT) # <-- ADD THIS LINE
cur = conn.cursor()
cur.execute("CREATE DATABASE tesis ;")
conn.commit()
```

0.2 Agregar Postgis

```
In [5]: conn = psycopg2.connect("dbname=tesis user=postgres password=korbo host=localhost")
cur = conn.cursor()
cur.execute("create extension postgis;")
conn.commit()
```

0.3 Agregar el shapefile de Parcelas a la base de datos

```
In [8]: conn = psycopg2.connect("dbname=tesis user=postgres password=korbo host=localhost")
cur = conn.cursor()
#opening shapefile
shpfile = '../17_GIS/Shapes/BajoCural/Parcelas_BajoCural.shp'
shapefile = ogr.Open(shpfile)
layer = shapefile.GetLayer(0)
#Create table
Fields=['NOMBRE', 'CONDICION', 'NOM_DEP', 'NOM_PRO', 'NOM_DIS', 'NOM_SECT', 'NOM_COM', 'NOM_PI']
string_to_create="create table lotes("
for i in Fields:
    string_to_create+=i + " text,"
string_to_create = string_to_create+"geom geometry(POLYGON,32719));"
```

```

cur.execute(string_to_create)
for i in range(layer.GetFeatureCount()):
    feature = layer.GetFeature(i)
    nombre = feature.GetField(Fields[0])
    condicion = feature.GetField(Fields[1])
    nom_dep = feature.GetField(Fields[2])
    nom_pro = feature.GetField(Fields[3])
    nom_dis = feature.GetField(Fields[4])
    nom_sect = feature.GetField(Fields[5])
    nom_com = feature.GetField(Fields[6])
    nom_pre = feature.GetField(Fields[7])[5:]
    wkt = feature.GetGeometryRef().ExportToWkt()
    cur.execute("insert into lotes(nombre,condicion,nom_dep,nom_pro,nom_dis,nom_sect,n
conn.commit()

```

0.4 Crear DataFrame de roles

```

In [10]: Lat1 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='La
Lat2 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=2, sheet_name='la
Lat3 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
Lat4 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
Lat5 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
Lat6 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
Lat7 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
Lat8 = pd.read_excel('../12_Excels/Solicitado/RolRiego.xls', skiprows=5, sheet_name='la
rol = result = pd.concat([Lat1, Lat2, Lat3, Lat4, Lat5, Lat6, Lat7, Lat8], sort=False)
rol.columns = rol.columns.str.lower()
rol.head()

```

```

Out[10]:
   nż      usuario  area  horas  comienza  termina \
0  007  APAZA ROMERO, EDMUNDO  2.5  3h.20'  10h.30'a.m.  01h.50'p.m.
1  009  MEZA MEZA, MAURO  3.5  4h.35'  05h.20'p.m.  09h.55'p.m.
2  012  MANCHEGO FERNANDEZ, ELOY  3.2  4h.15'  02h.35'a.m.  06h.50'a.m.
3  014  YANQUI VDA. DE MAYTA, CLARA  2.5  3h.20'  10h.10'.a.m.  01h.30'p.m.
4  015  CORNEJO SALAS, ARNULFO  2.5  3h.20'  01h.30'p.m.  04h.25'p.m.

   lote
0      1
1      2
2      3
3      4
4      5

```

0.5 Añadir Dataframe de roles a base de datos

```

In [12]: from sqlalchemy import create_engine
engine = create_engine('postgresql://postgres:korbo@localhost:5432/tesis')
rol.to_sql('rol', engine)

```

```
conn = psycopg2.connect("dbname=tesis user=postgres password=korbo host=localhost")
cur = conn.cursor()
cur.execute("select * from rol;")
a = cur.fetchall()
conn.commit()
for i in a[0:5]:
    print(i)
```

```
(0, '007', 'APAZA ROMERO, EDMUNDO', 2.5, "3h.20'", "10h.30'a.m.", "01h.50'p.m.", '1.0')
(1, '009', 'MEZA MEZA, MAURO ', 3.5, "4h.35'", "05h.20'p.m.", "09h.55'p.m.", '2.0')
(2, '012', 'MANCHEGO FERNANDEZ, ELOY ', 3.2, "4h.15'", "02h.35'a.m.", "06h.50'a.m.", '3.0')
(3, '014', 'YANQUI VDA. DE MAYTA, CLARA', 2.5, "3h.20'", "10h.10'.a.m.", "01h.30'p.m.", '4.0')
(4, '015', 'CORNEJO SALAS, ARNULFO ', 2.5, "3h.20'", "01h.30'p.m.", "04h.25'p.m.", '5.0')
```

0.6 Comparar áreas según Rol y áreas según Postgis

```
In [14]: conn = psycopg2.connect("dbname=tesis user=postgres password=korbo host=localhost")
cur = conn.cursor()
cur.execute("SELECT t1.lote,t2.nombre,t1.usuario, t1.area, st_area(t2.geom)/10000 FROM")
a = cur.fetchall()
conn.commit()
summary = [[desc[0] for desc in cur.description]]
for i in a:
    summary.append(list(i))

summary[0][-1] = 'st_area'
df = pd.DataFrame(summary[1:])
df.columns = summary[0]
df.head()
```

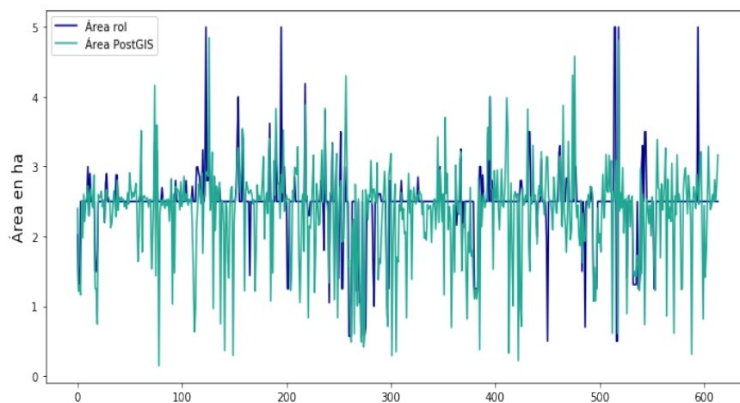
```
Out[14]:
```

	lote	nombre	usuario
0	21	SUCASACA SUCASACA, ABDON CAYETANO	SILA SOTO, SADHI F.
1	30	TEJADA JIMENEZ, ROSENDO	TEJADA ROSA PUMA DE
2	30	TEJADA JIMENEZ, ROSENDO	TEJADA ROSA PUMA DE
3	46	ROCA GAMARRA, CARLOS ALBERTO	ROCA GAMARRA, CARLOS ALBERTO
4	61	HUARACHA CANALES, JUSTA RENE	TICONA TICONA, HONORATO

	area	st_area
0	2.02	2.399418
1	1.25	1.213548
2	1.25	1.298553
3	2.50	1.163342
4	2.50	2.496311

0.7 Graficar diferencias

```
In [36]: fig, ax = plt.subplots(1,1,figsize=(10, 5))
df['area'].plot(ax=ax, label='Área rol',legend=True,color='#00028c')
df['st_area'].plot(ax=ax,label='Área PostGIS', legend=True,color='#21aa93')
ax.legend(loc='best')
ax.set_ylabel('Área en ha', size=14)
fig.tight_layout()
fig.savefig('PostGIS/DiferenciaAreasRolPostgis.png')
```



0.8 Cerrar conexión a base de datos

```
In [38]: conn.close()
```

**ANEXO 16: FILTRACIÓN DE AGUA EN COMPUERTA Y OTROS USOS QUE SE LE
DAN AL AGUA**



ANEXO 17: MUESTREO DE SUELO REALIZADO EN EL LOTE 53 DEL LATERAL 7



ANEXO 18: AFOROS REALIZADOS EN LA IRRIGACIÓN BAJO CURAL



ANEXO 19: CULTIVOS IMPLEMENTADOS PARA LOS MODELOS DE NECESIDADES HÍDRICAS EN FORMATO DE DICCIONARIOS DE PYTHON

Cultivos

May 5, 2019

```
In [2]: import datetime
Ajo = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
      'stage': {'Initial':17,'Development':27, 'MidSeason':47,'LateSeason':30},
      'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.9,'LateSeason':
      'ProfundidadRaices':{'0':0.1,'Initial':'Interpolate','Development':0.2,'MidSea:
      'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.4,'Development':'Interpolate','MidSea:

Alberja1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,15), #np.datetime64(d)
           'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
           'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSeason':
           'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
           'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:

Alberja3 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,4,15), #np.datetime64(d)
           'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
           'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSeason':
           'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
           'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:

Alberja4 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,5,1), #np.datetime64(d)
           'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
           'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSeason':
           'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
           'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:

Alberja2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
           'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
           'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSeason':
           'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
           'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:

Alberja5 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
           'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
           'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSeason':
           'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
           'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:
```

```

Alfalfa = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':92,'Development':91, 'MidSeason':91,'LateSeason':91},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.86,'LateSeason':
'ProfundidadRaices':{'0':0.1,'Initial':'Interpolate','Development':0.5,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.55,'Development':'Interpolate','MidSe:

Avena = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':15,'Development':30, 'MidSeason':45,'LateSeason':30},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.8,'LateSeason':
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.55,'Development':'Interpolate','MidSe:

Cebada = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':15,'Development':30, 'MidSeason':45,'LateSeason':30},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.8,'LateSeason':
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.6,'Development':'Interpolate','MidSea:

Cebolla1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':25,'Development':35, 'MidSeason':70,'LateSeason':50},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSea:
'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.15,'M:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate','M:

Cebolla2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':25,'Development':35, 'MidSeason':70,'LateSeason':50},
'kc':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.75,'LateSea:
'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.15,'M:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate','M:

MaizAmilaceo1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':31,'Development':31, 'MidSeason':43,'LateSeason':
'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.6,'Late:
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate

MaizAmilaceo2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,4,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':31,'Development':31, 'MidSeason':43,'LateSeason':1
'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.6,'Late:
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate

Palto = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':90,'Development':90, 'MidSeason':95,'LateSeason':90},
'kc':{'Initial':0.6,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason
'ProfundidadRaices':{'0':0.3,'Initial':'Interpolate','Development':1,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.7,'Development':'Interpolate','MidS:

```

```

Papa2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason':0.85},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeason':0.6},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.25}}

Papa3 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason':0.85},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeason':0.6},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.25}}

Papa4 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,9,1), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason':0.85},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeason':0.6},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.25}}

Papa5 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,9,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason':0.85},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeason':0.6},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.25}}

Papa1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,1), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.85,'LateSeason':0.85},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeason':0.6},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.25}}

Zanahoria = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':28,'Development':33, 'MidSeason':39,'LateSeason':20},
            'kc':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate', 'MidSeason':0.9,'LateSeason':0.9},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.2,'MidSeason':0.2},
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.3}}
    
```

```
In [1]: import datetime
```

```

Ajo = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':17,'Development':27, 'MidSeason':47,'LateSeason':30},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.1,'Initial':'Interpolate','Development':0.2,'MidSeason':0.2},
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.4,'Development':'Interpolate','MidSeason':0.4},
        'ETSEBAL':{'20180314":2.63472,"20180415":3.03018,"20180501":3.3744,"20180602":3.3744}}
    
```

```

Alberja1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'M:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','M:
            'ETSEBAL':{'20180314':2.305253,'20180330':2.939463333333333,'20180415':2.28:

Alberja3 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,4,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:
            'ETSEBAL':{'20180415':1.504456666666667,'20180517':2.179913333333333,'2018060:

Alberja4 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,5,1), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:
            'ETSEBAL':{'20180501':2.04553,'20180517':1.48425,'20180602':1.9951,'2018061:

Alberja2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:
            'ETSEBAL':{'20180314':2.76654,'20180415':2.20528,'20180501':2.79334,'20180:

Alberja5 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':25, 'MidSeason':35,'LateSeason':15},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSea:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate','MidSea:
            'ETSEBAL':{'20170818':3.06934,'20170903':3.60736,'20171021':4.51502,'201711:

Alfalfa = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':92,'Development':91, 'MidSeason':91,'LateSeason':91},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.1,'Initial':'Interpolate','Development':0.5,'MidSeas:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.55,'Development':'Interpolate','MidSe:
            'ETSEBAL':{'20170802':3.60575,'20170903':3.659445,'20171005':2.8247,'2017112:

Avena = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
            'stage': {'Initial':15,'Development':30, 'MidSeason':45,'LateSeason':30},
            'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5,'MidSeas:
            'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.55,'Development':'Interpolate','MidSe:
            'ETSEBAL':{'20180314':1.53321,'20180602':1.72986,'20180618':1.7547,'20180704':

Cebada = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)

```

```

'stage': {'Initial':15,'Development':30, 'MidSeason':45,'LateSeason':30},
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.6,'Development':'Interpolate','MidSea:
'ETSEBAL':{'20170818':1.34926,'20170903':3.3398,'20170919':3.15458,'20171005'

Cebolla1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':25,'Development':35, 'MidSeason':70,'LateSeason':50},
'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.15,'M:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate','M:
'ETSEBAL':{'20170802':2.65421086956522,'20170903':2.89678347826087,'2017102

Cebolla2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)'stage': {'Ini
'stage': {'Initial':25,'Development':35, 'MidSeason':70,'LateSeason':50},
'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.15,'M:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.35,'Development':'Interpolate','M:
'ETSEBAL':{'20170818':2.136870666666667,'20170919':3.039046666666667,'2017100

MaizAmilaceo1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':31,'Development':31, 'MidSeason':43,'LateSeason':
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate
'ETSEBAL':{'20180314':2.76654,'20180415':2.20528,'20180517':2.92679,'2

MaizAmilaceo2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,4,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':31,'Development':31, 'MidSeason':43,'LateSeason':1:
'ProfundidadRaices':{'0':0.2,'Initial':'Interpolate','Development':0.5
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.5,'Development':'Interpolate
'ETSEBAL':{'20180415':0.46062,'20180517':2.1496,'20180602':2.87165,'20

Palto = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,1), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':90,'Development':90, 'MidSeason':95,'LateSeason':90},
'ProfundidadRaices':{'0':0.3,'Initial':'Interpolate','Development':1,'MidSeas:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.7,'Development':'Interpolate','MidS:
'ETSEBAL': {'20170802':2.44316,'20170903':3.320106666666667,'20171021':3.52983,

Papa2 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,3,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidS:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','Mid:
'ETSEBAL':{'20180330':3.19116,'20180517':2.72346,'20180602':3.46816,'20180704'

Papa3 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,8,15), #np.datetime64(d)
'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidS:
'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','Mid:
'ETSEBAL':{'20170818':2.44783,'20170919':3.01017,'20171021':3.25559,'20171122

```

```

Papa4 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,9,1), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidS:
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','Mid:
        'ETSEBAL':{'20170903':3.06874,'20171021':4.76347,'20171122':3.93752,'20171224'

Papa5 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2017,9,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidS:
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','Mid:
        'ETSEBAL':{'20170919':2.91808,'20171021':3.575035,'20171122':2.798405,'2017122:

Papa1 = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,1), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':24,'Development':29, 'MidSeason':42,'LateSeason':25},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.15,'Initial':'Interpolate','Development':0.6,'MidS:
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.25,'Development':'Interpolate','Mid:
        'ETSEBAL':{'20180330':3.3681,'20180415':2.07836,'20180501':2.04187}}

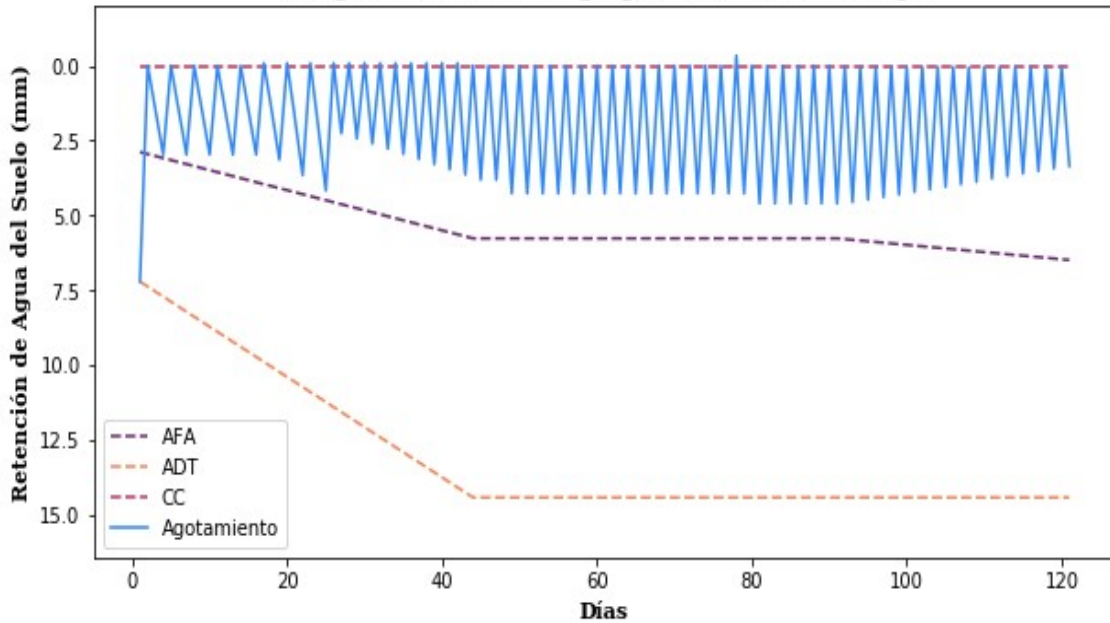
Zanahoria = {"FechaSiembra" : datetime.date(2018,2,15), #np.datetime64(d)
        'stage': {'Initial':28,'Development':33, 'MidSeason':39,'LateSeason':20},
        'ProfundidadRaices':{'0':0.05,'Initial':'Interpolate','Development':0.2,'|
        'FraccionAgotamientoCritico':{'Initial':0.3,'Development':'Interpolate','|
        'ETSEBAL':{'20180330':2.480176,'20180415':1.532862,'20180501':2.417732,'20

```

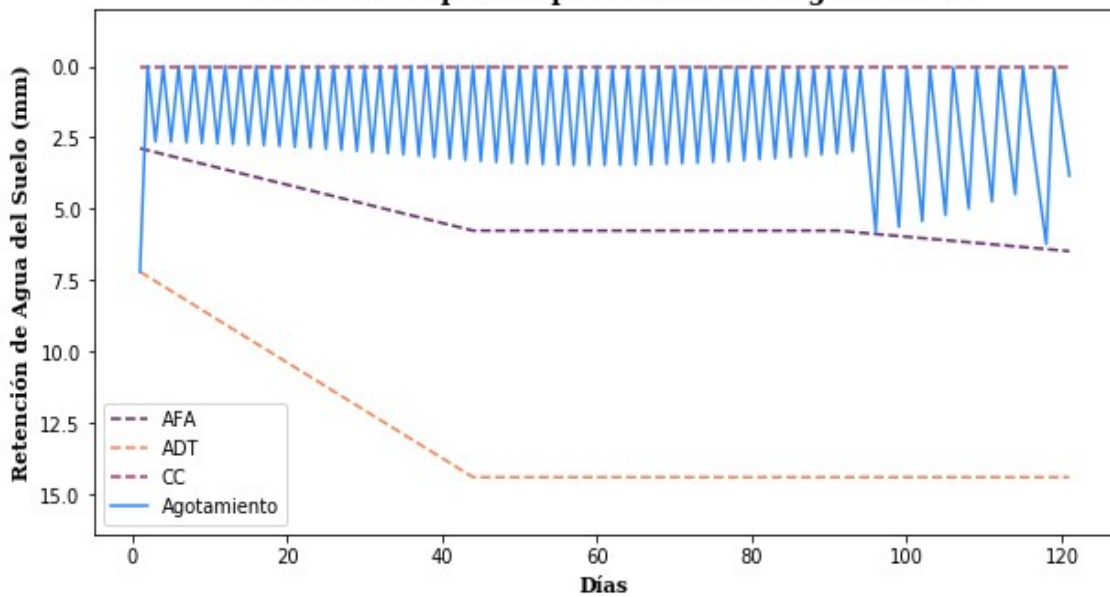
In []:

**ANEXO 20: REQUERIMIENTOS HÍDRICOS PROCESADOS PARA CADA CULTIVO
SEGÚN LOS MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REFERENCIAL PENMAN-
MONTEITH Y SEBAL**

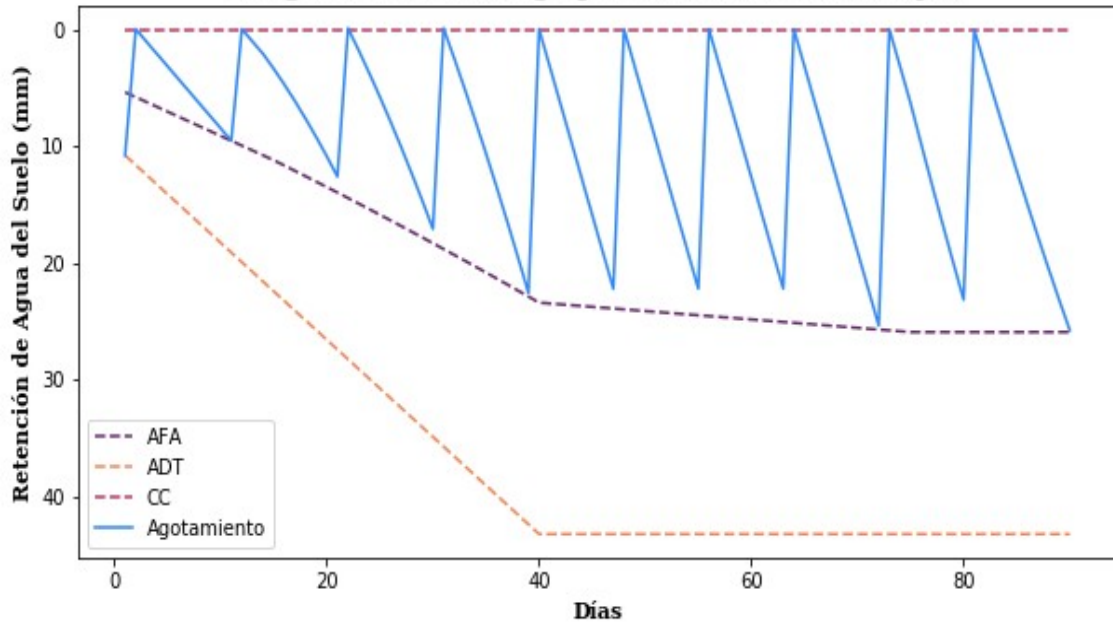
Programación de riego para el cultivo de Ajo



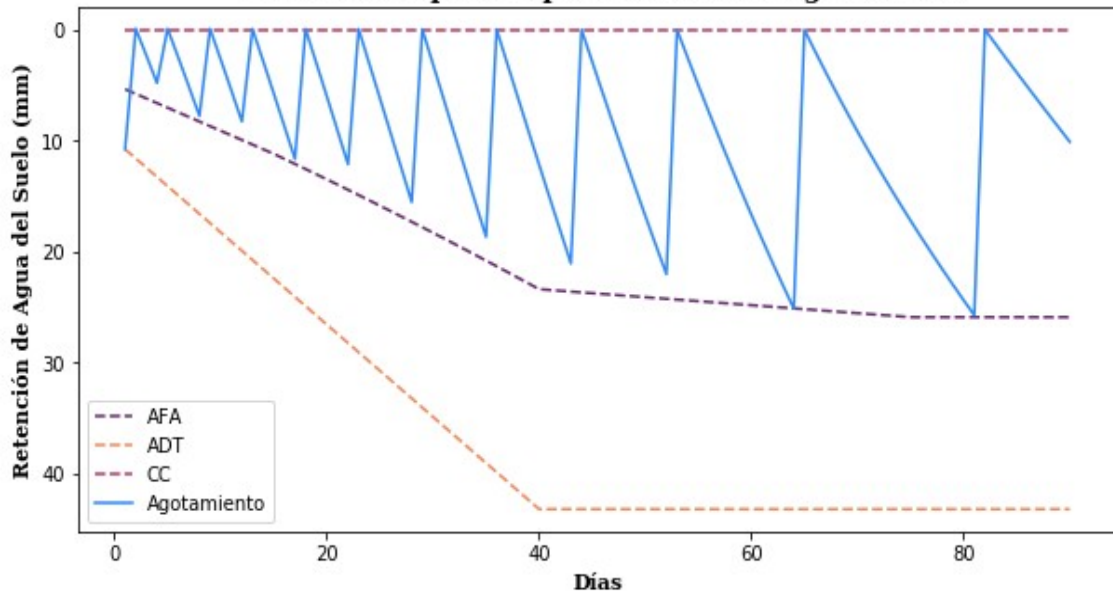
**Programación de riego para el cultivo de Ajo con
datos de Evapotranspiración actual según SEBAL**



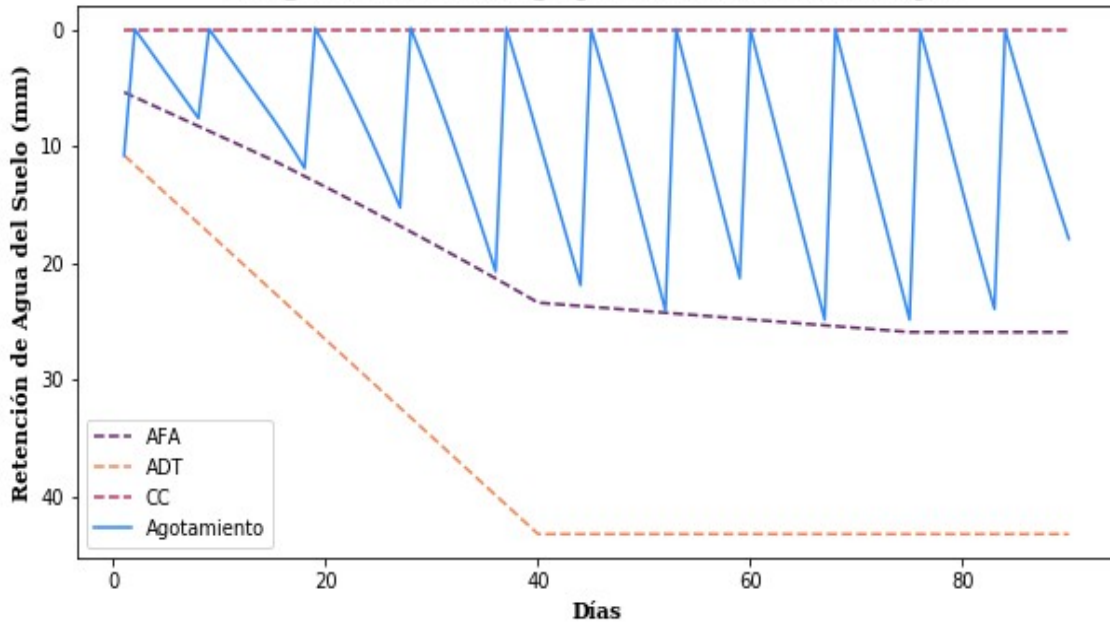
Programación de riego para el cultivo de Alberja1



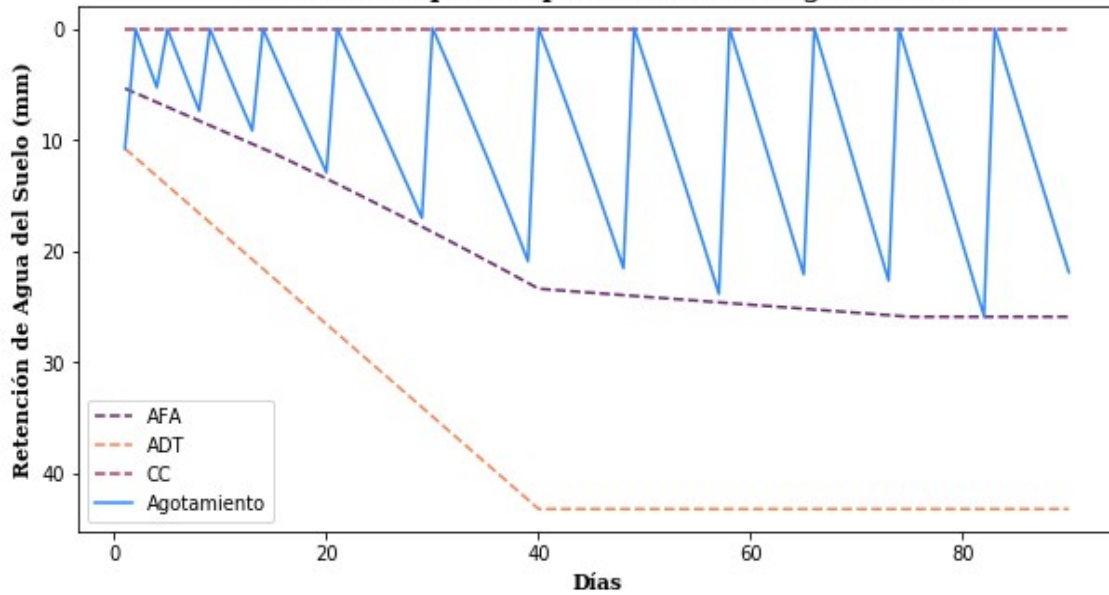
Programación de riego para el cultivo de Alberja1 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



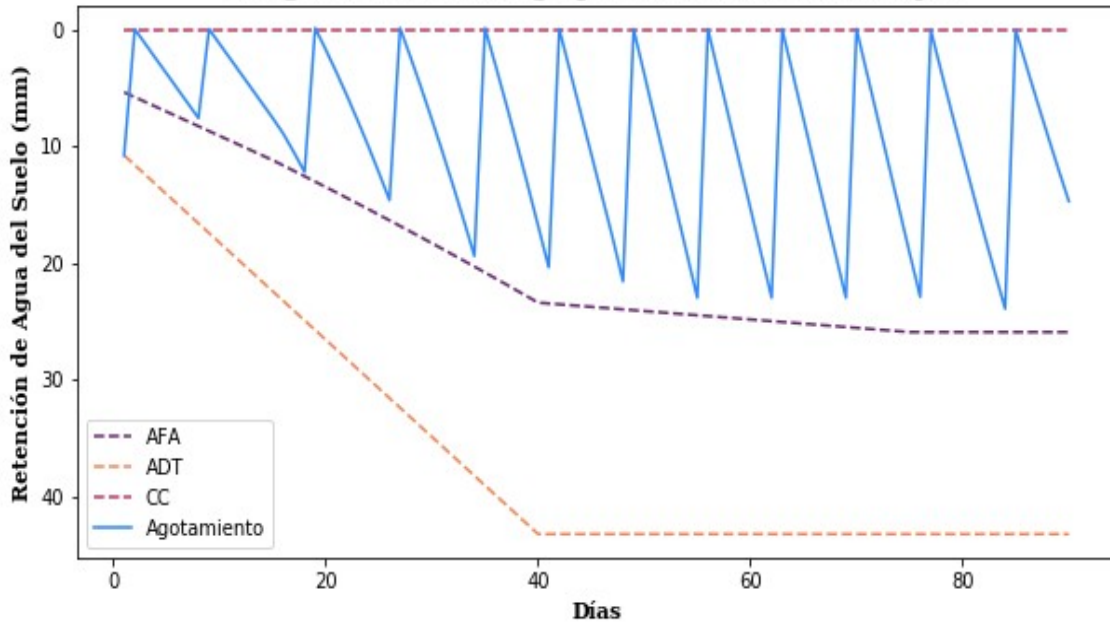
Programación de riego para el cultivo de Alberja2



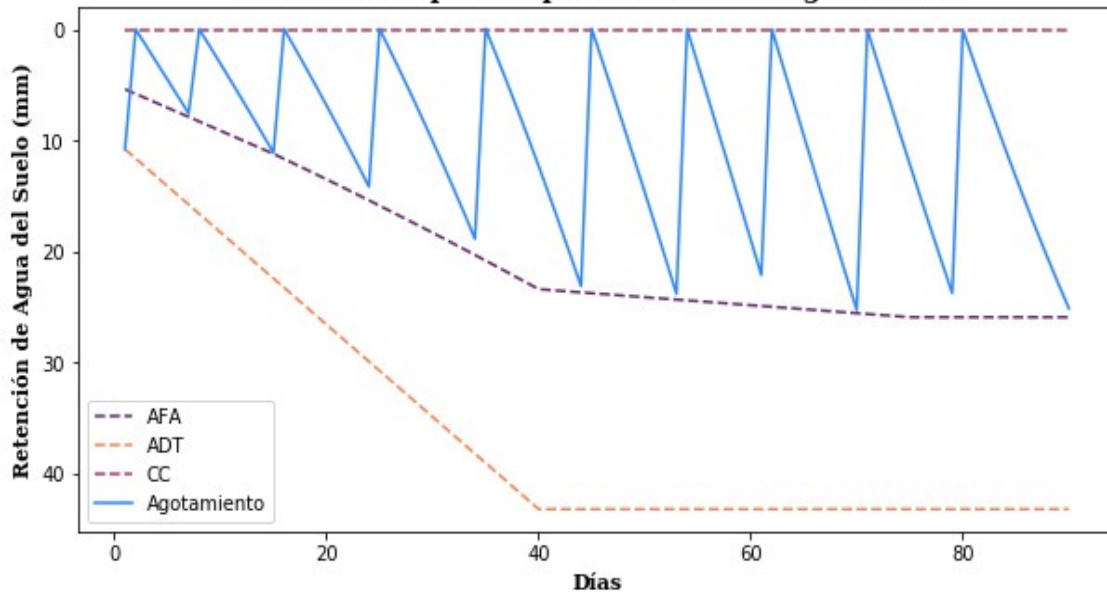
Programación de riego para el cultivo de Alberja2 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



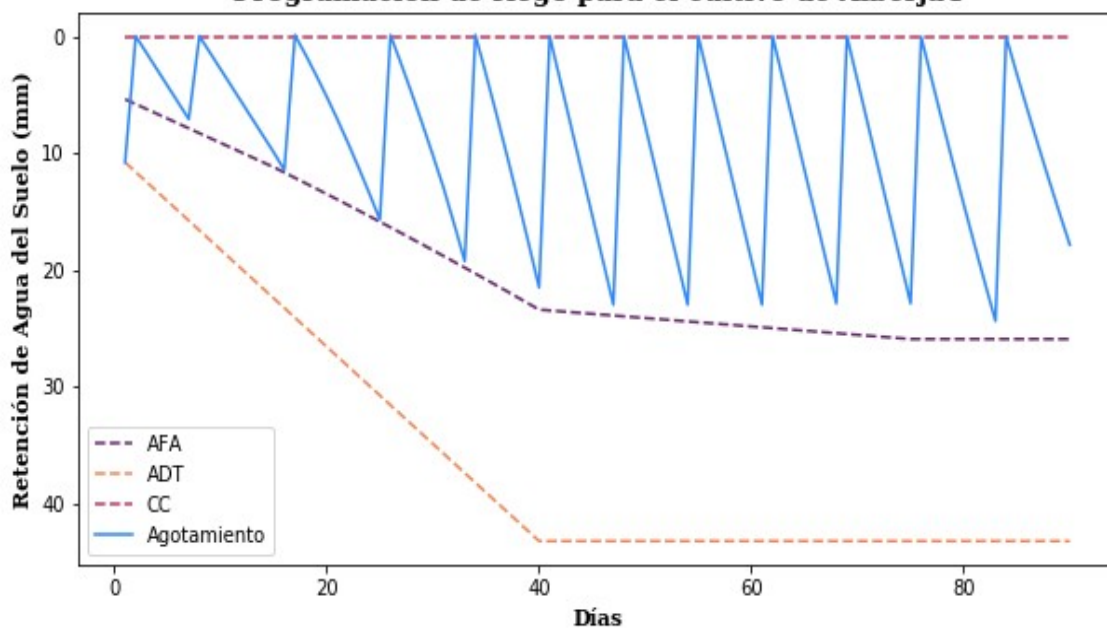
Programación de riego para el cultivo de Alberja3



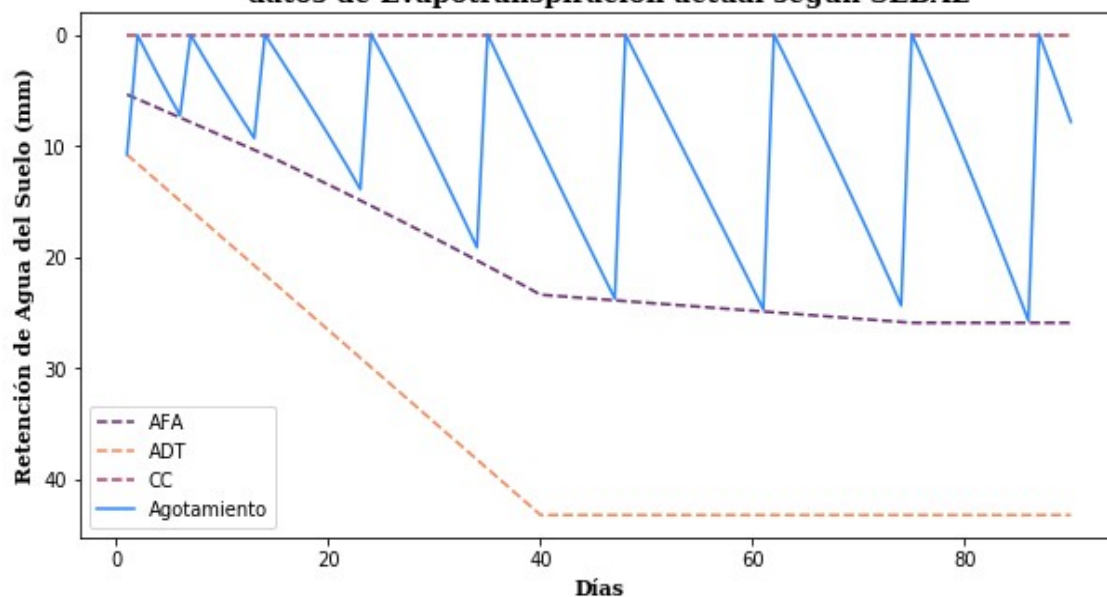
Programación de riego para el cultivo de Alberja3 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



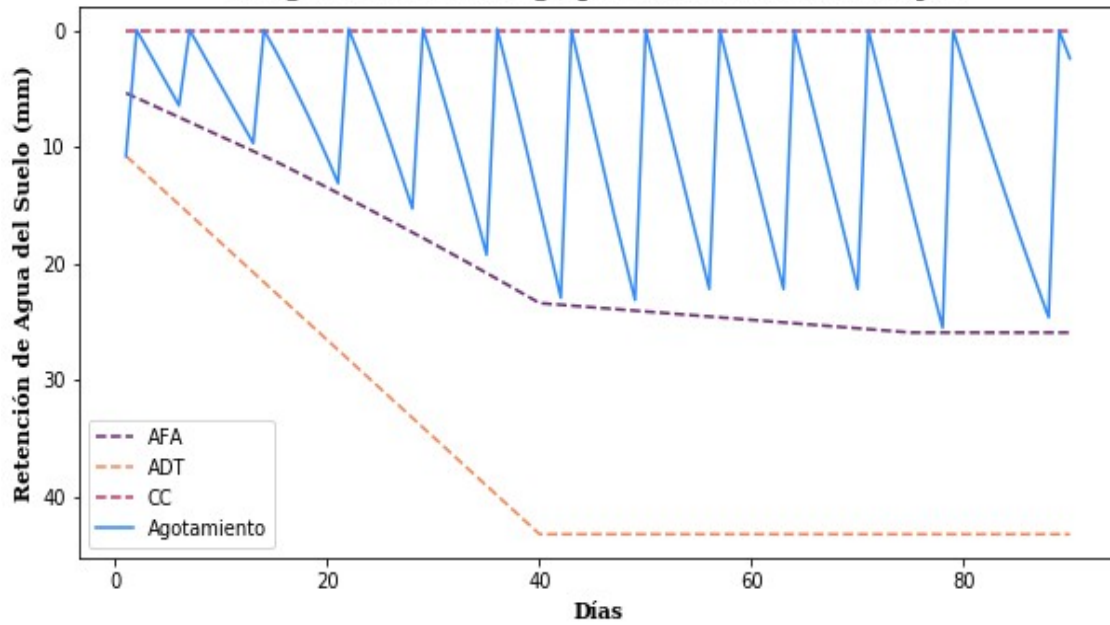
Programación de riego para el cultivo de Alberja4



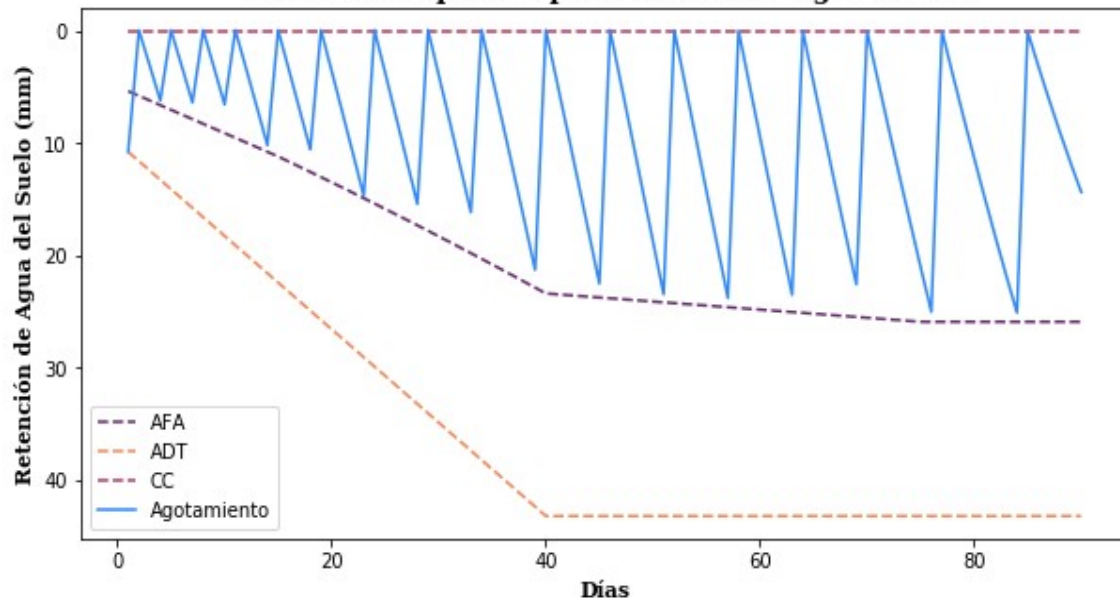
Programación de riego para el cultivo de Alberja4 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



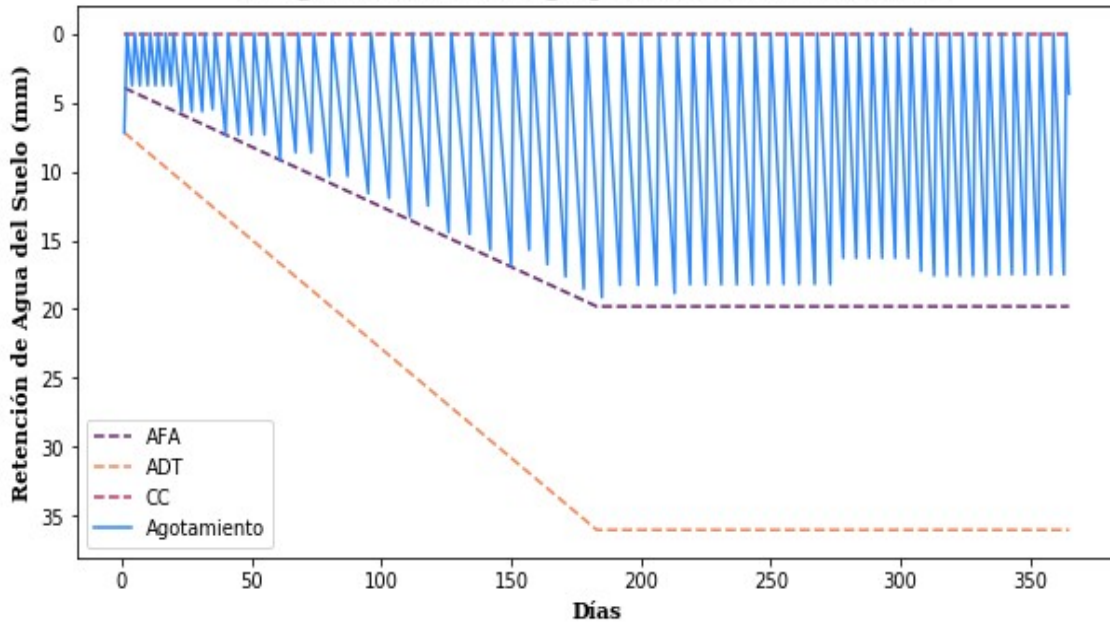
Programación de riego para el cultivo de Alberja5



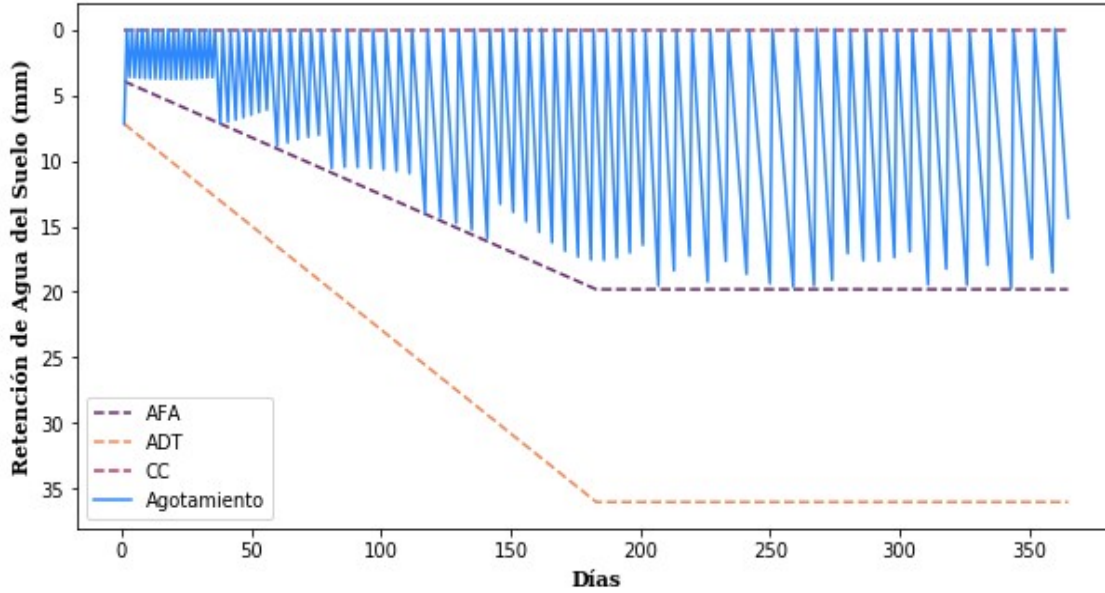
Programación de riego para el cultivo de Alberja5 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



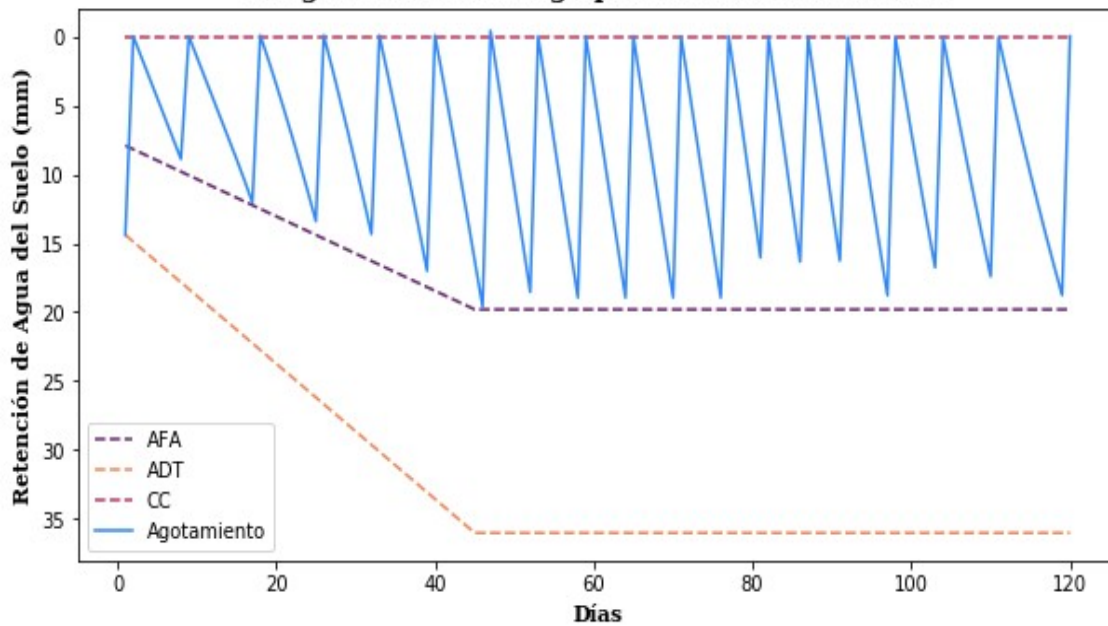
Programación de riego para el cultivo de Alfalfa



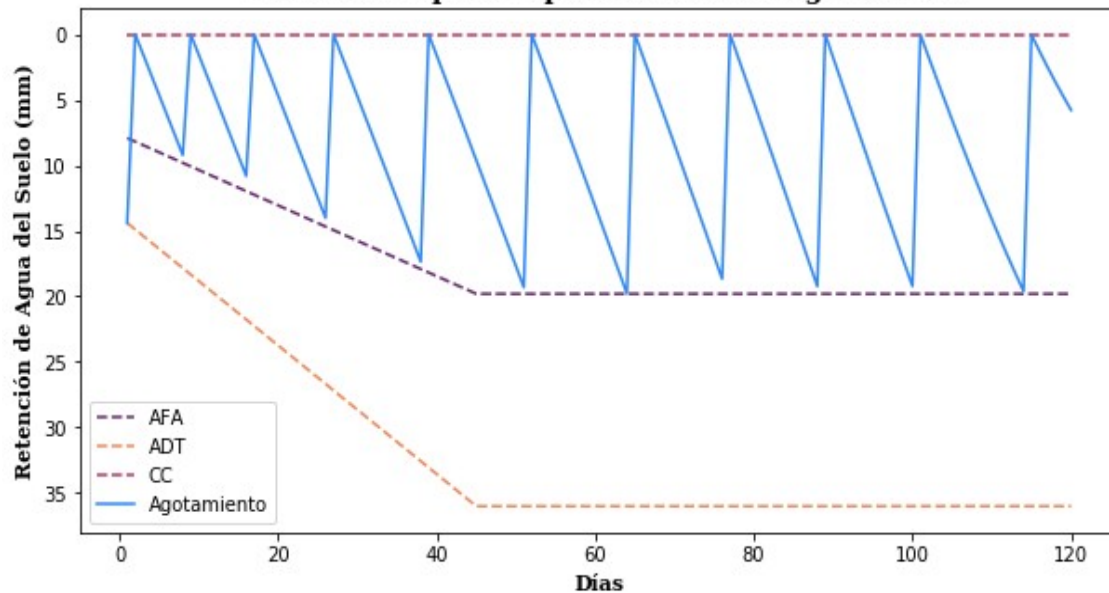
Programación de riego para el cultivo de Alfalfa con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



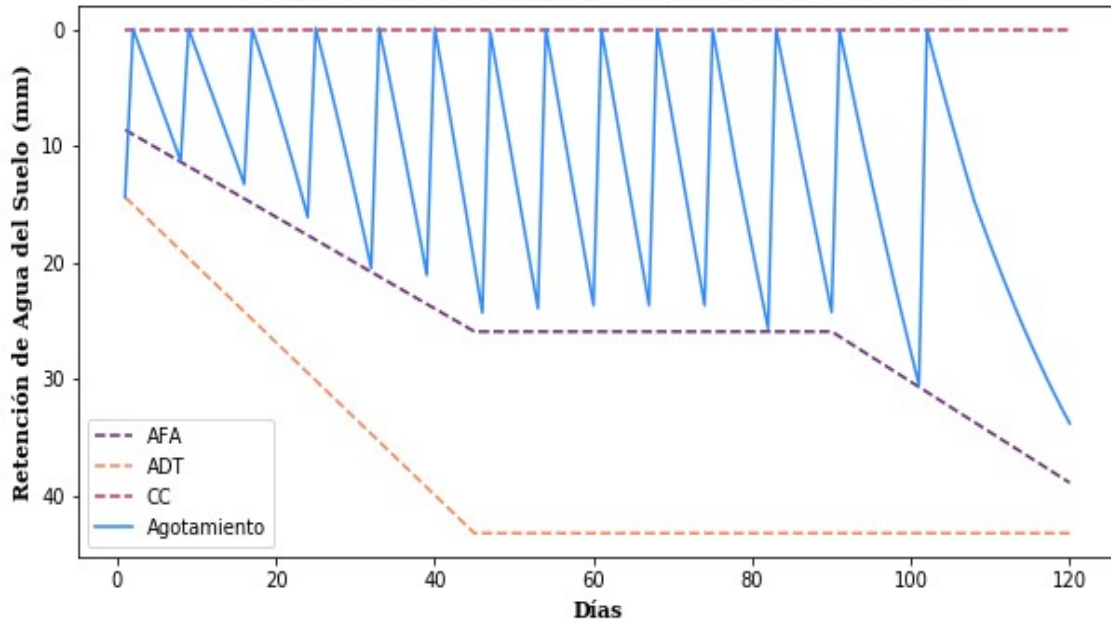
Programación de riego para el cultivo de Avena



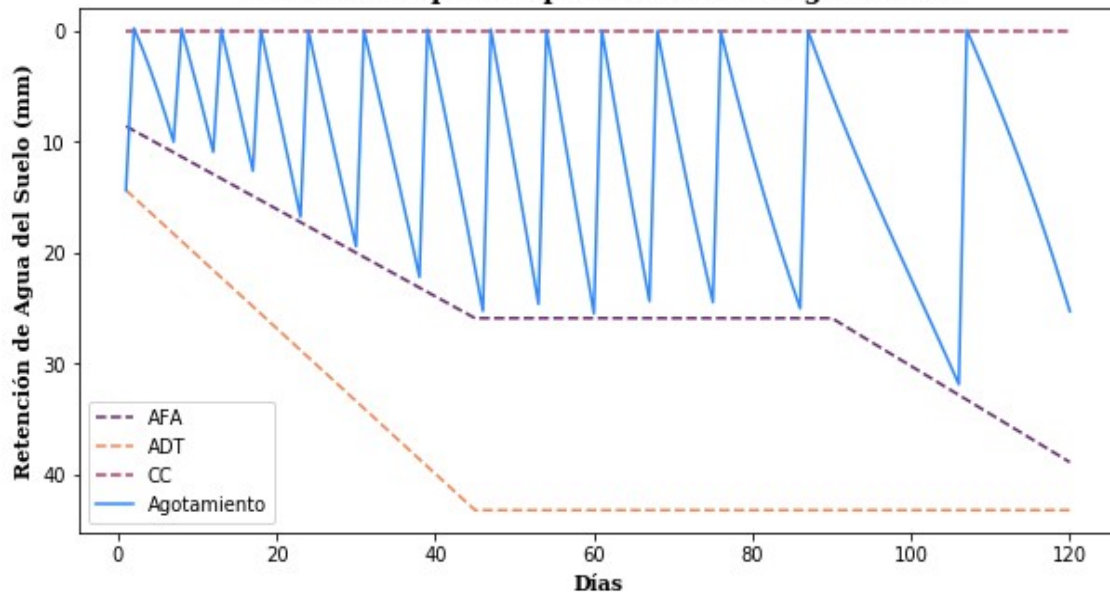
Programación de riego para el cultivo de Avena con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



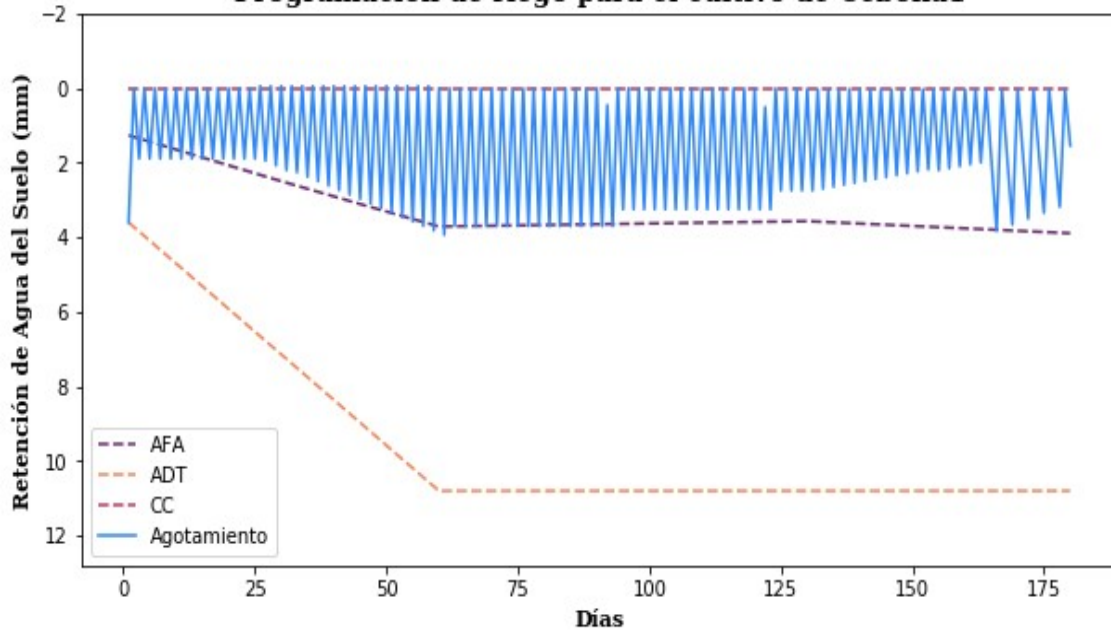
Programación de riego para el cultivo de Cebada



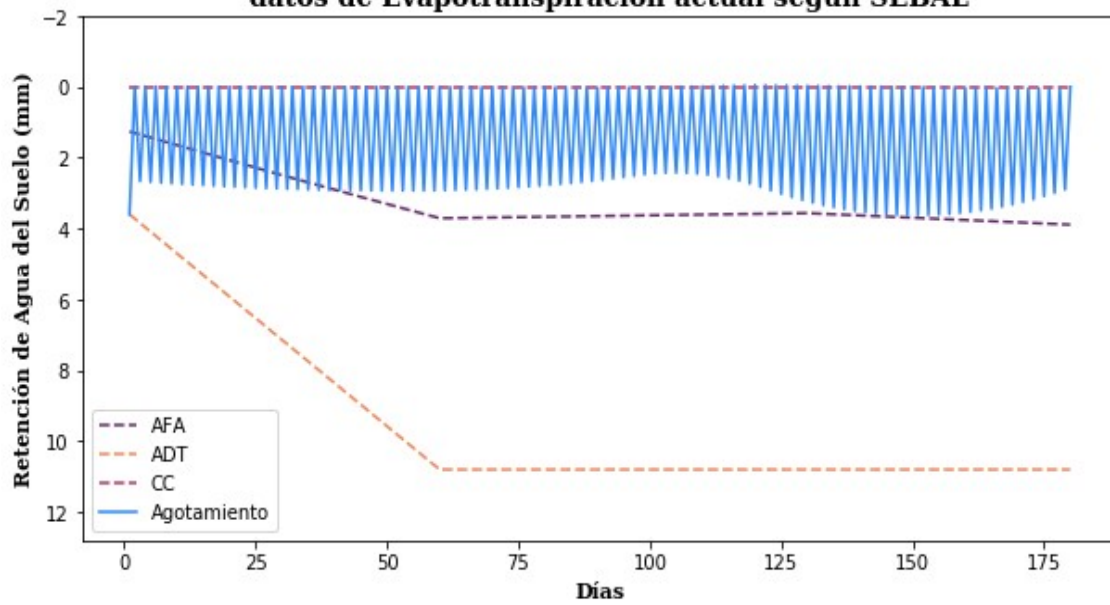
Programación de riego para el cultivo de Cebada con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



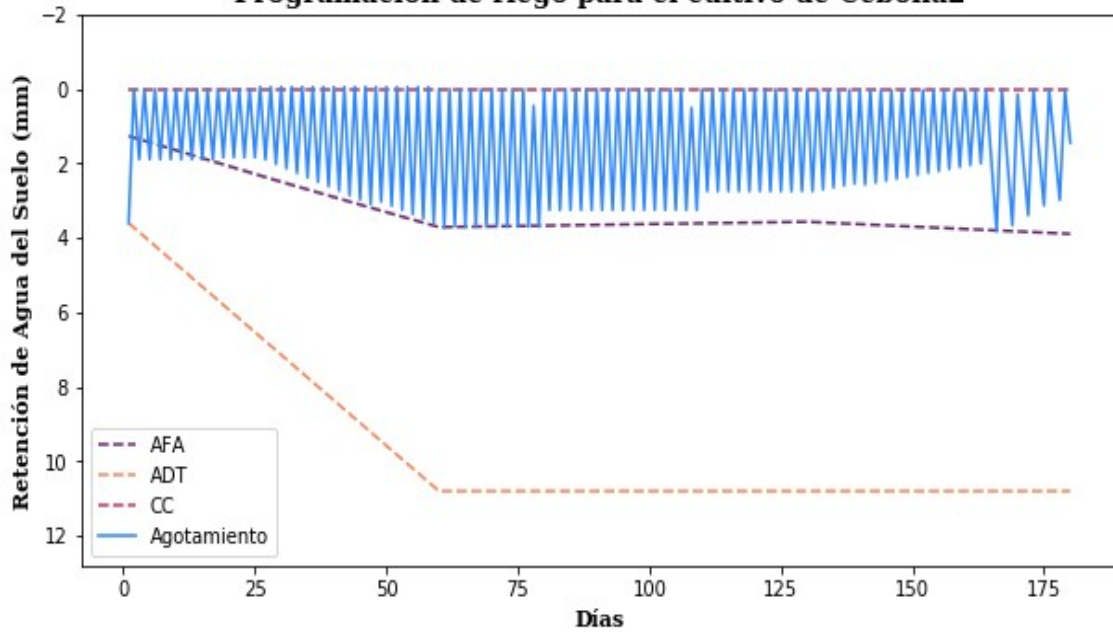
Programación de riego para el cultivo de Cebolla1



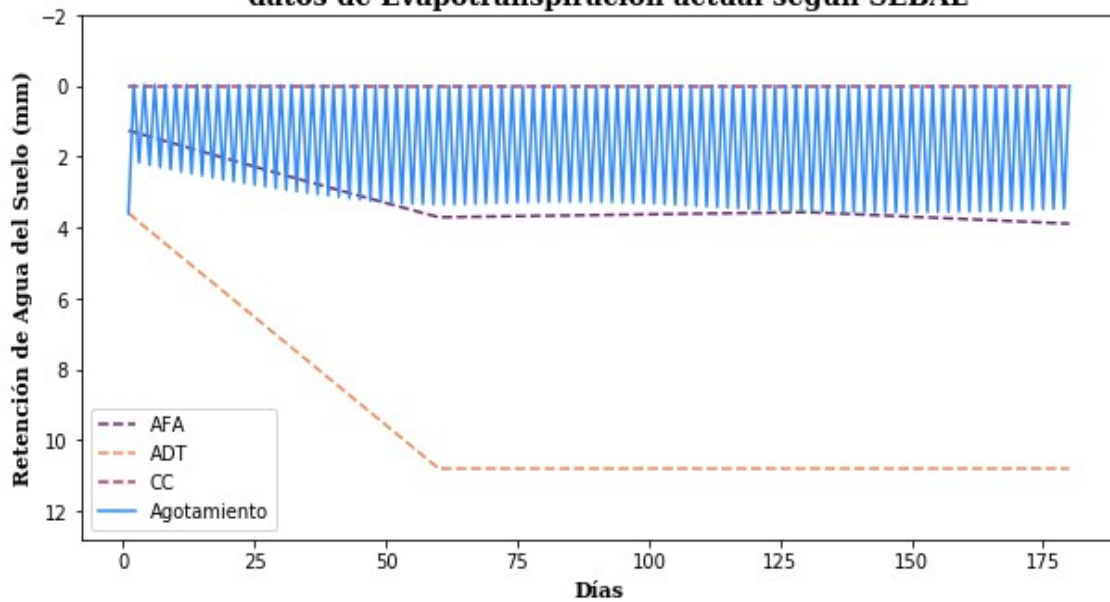
Programación de riego para el cultivo de Cebolla1 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



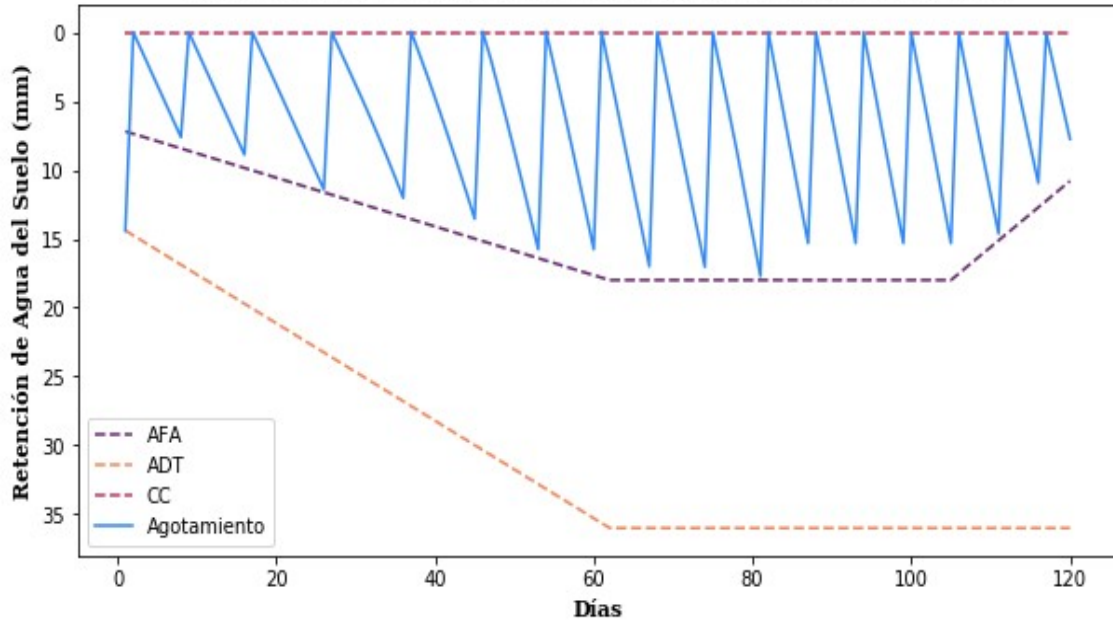
Programación de riego para el cultivo de Cebolla2



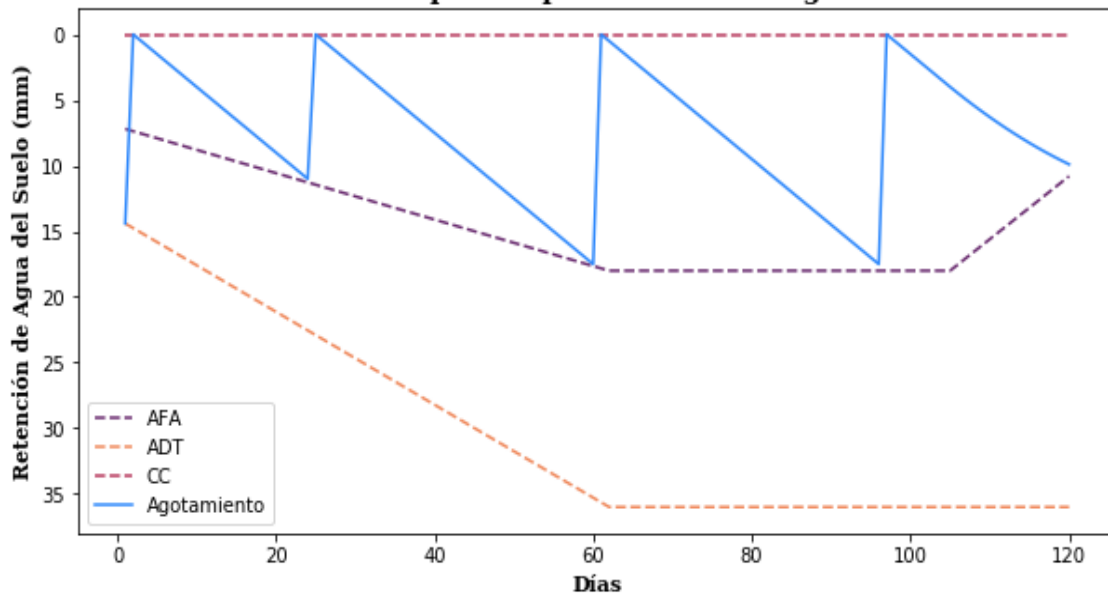
Programación de riego para el cultivo de Cebolla2 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



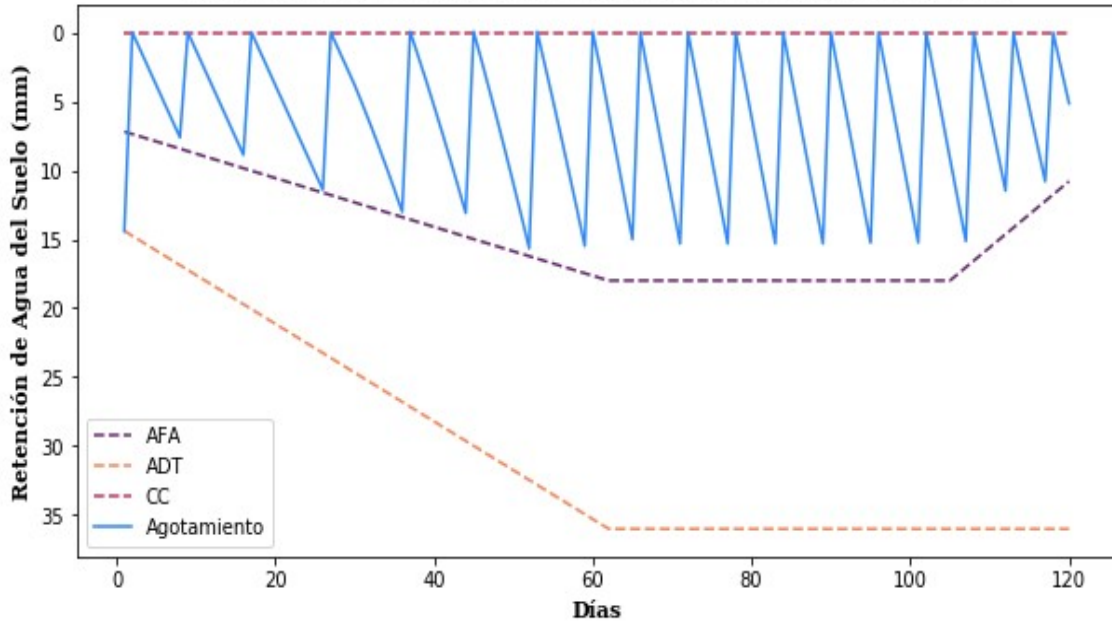
Programación de riego para el cultivo de MaizAmilaceo1



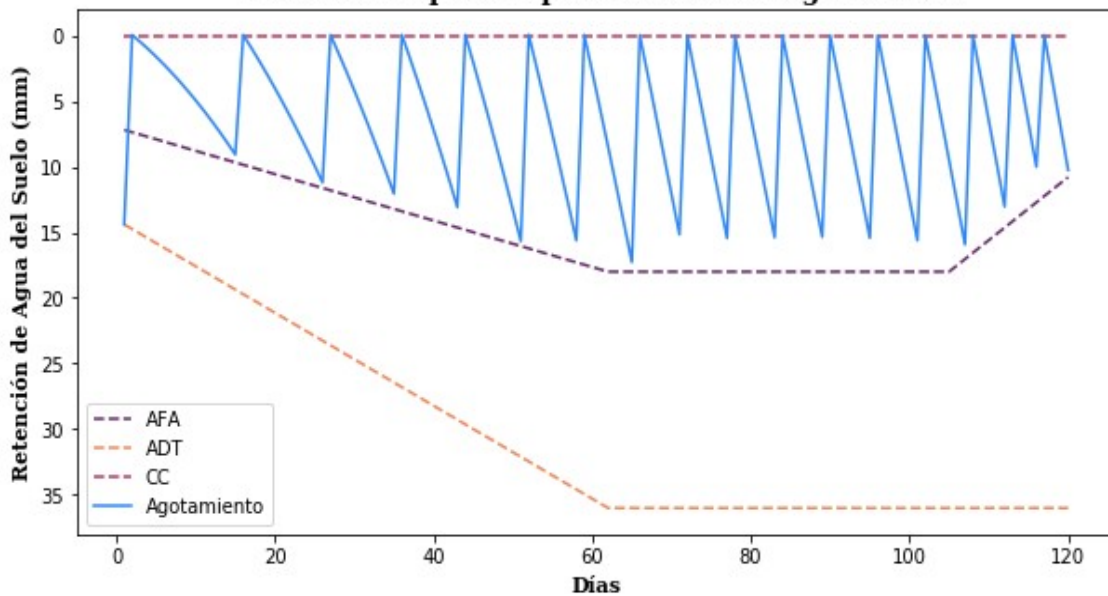
**Programación de riego para el cultivo de MaizAmilaceo1 con
datos de Evapotranspiración actual según SEBAL**



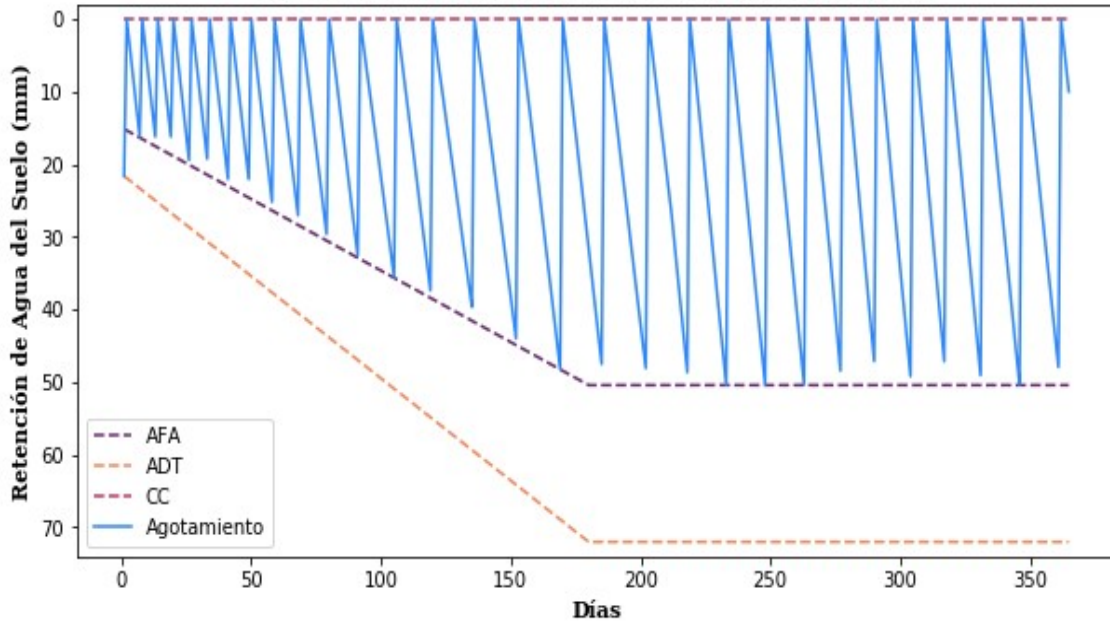
Programación de riego para el cultivo de MaizAmilaceo2



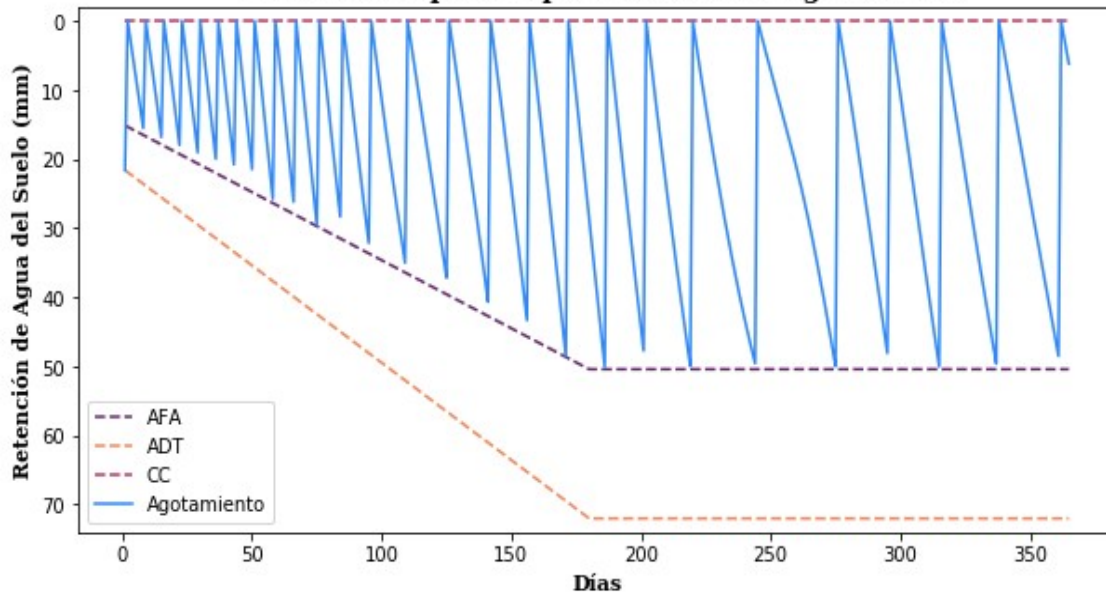
Programación de riego para el cultivo de MaizAmilaceo2 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



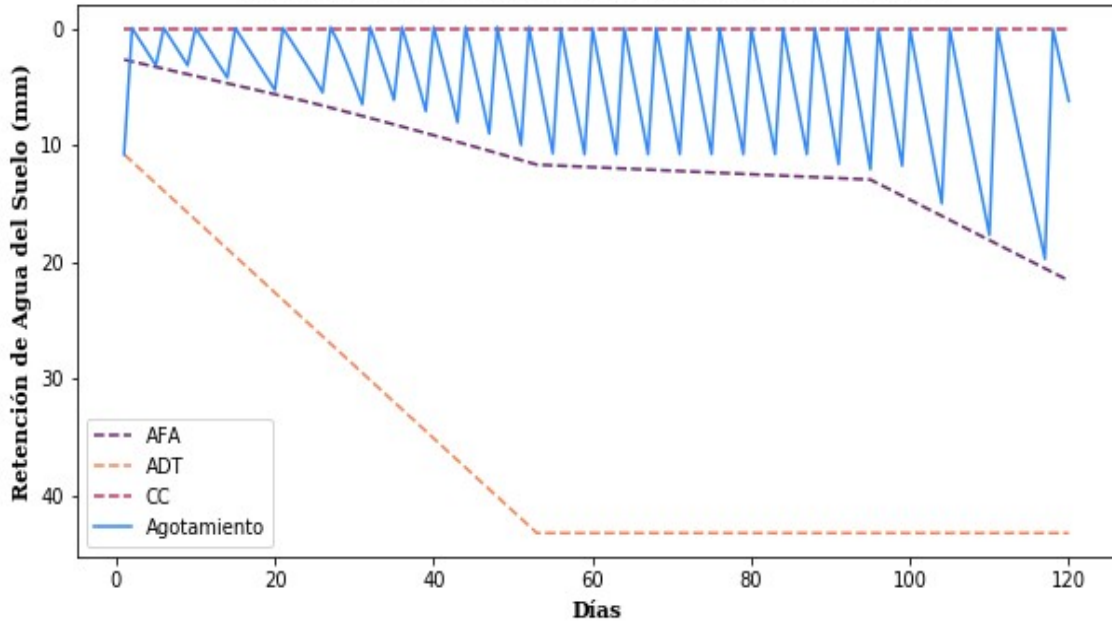
Programación de riego para el cultivo de Palto



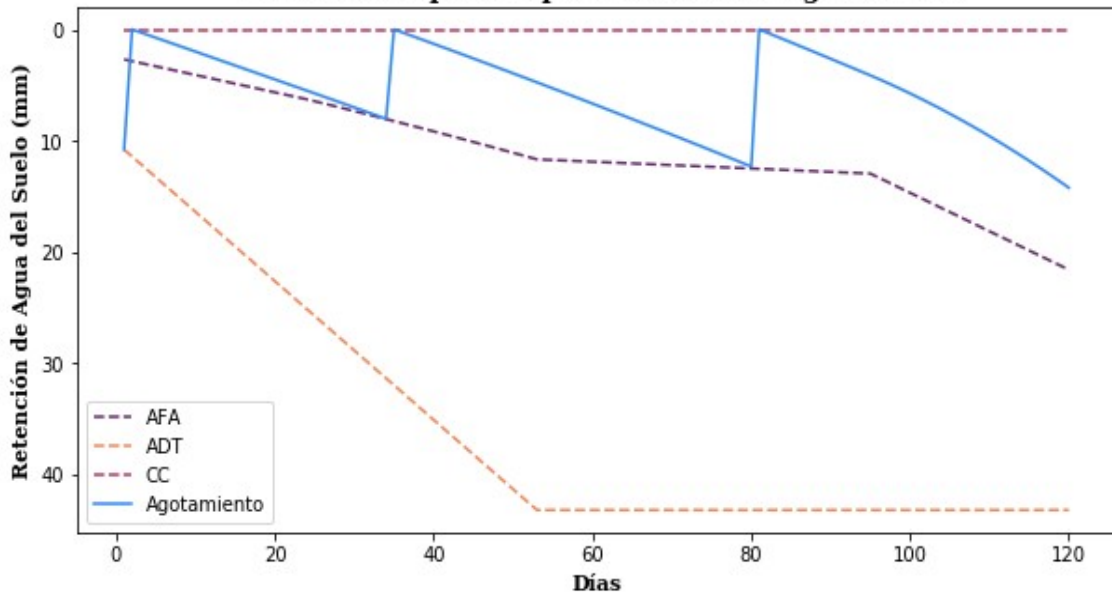
Programación de riego para el cultivo de Palto con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



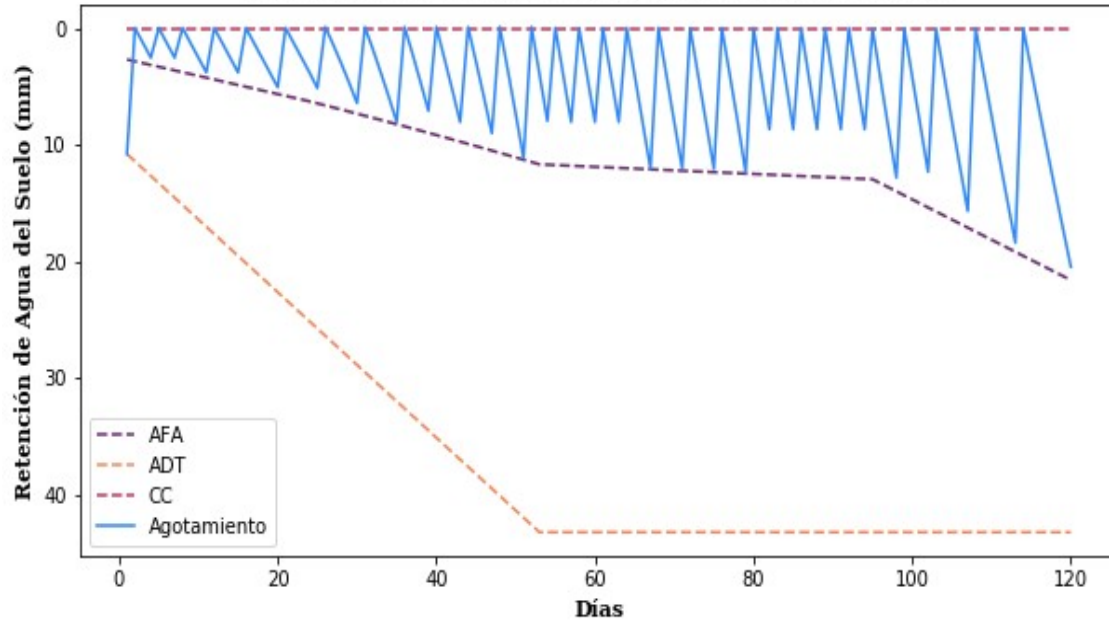
Programación de riego para el cultivo de Papa1



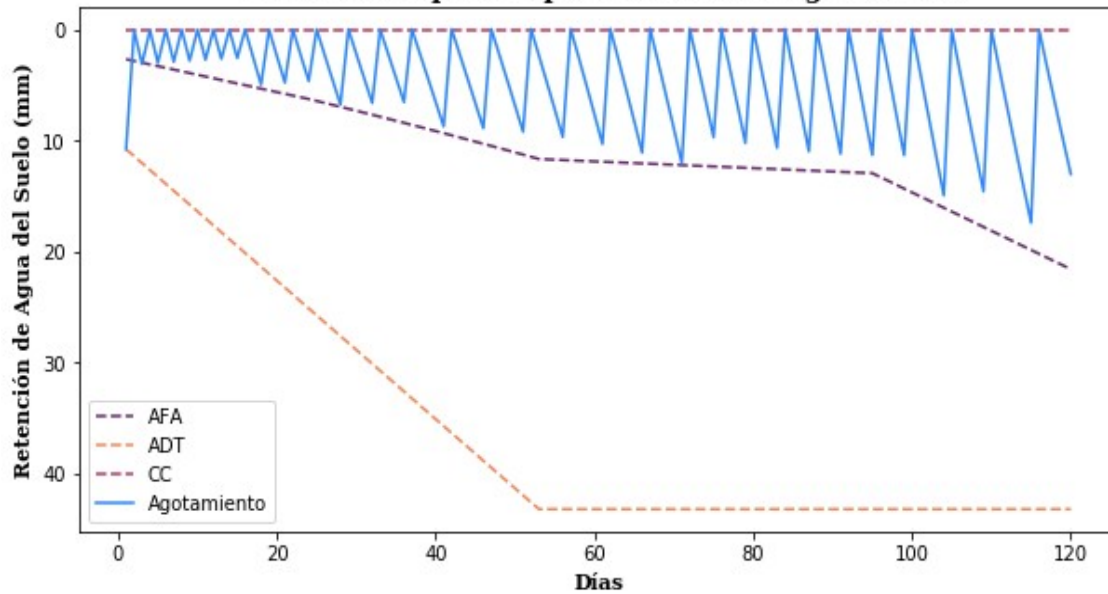
Programación de riego para el cultivo de Papa1 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



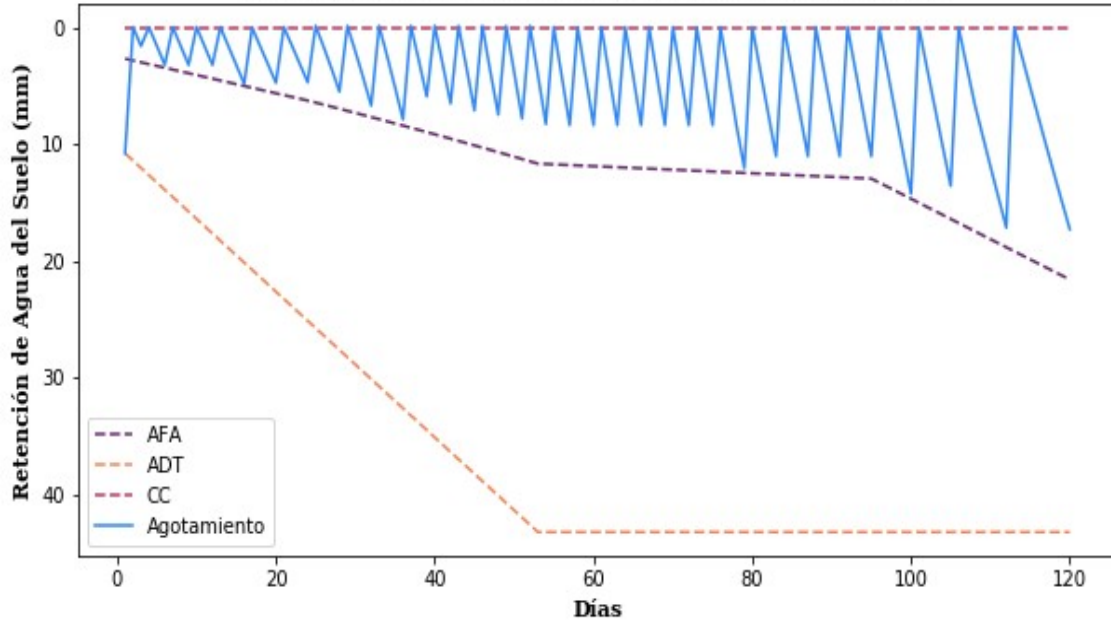
Programación de riego para el cultivo de Papa2



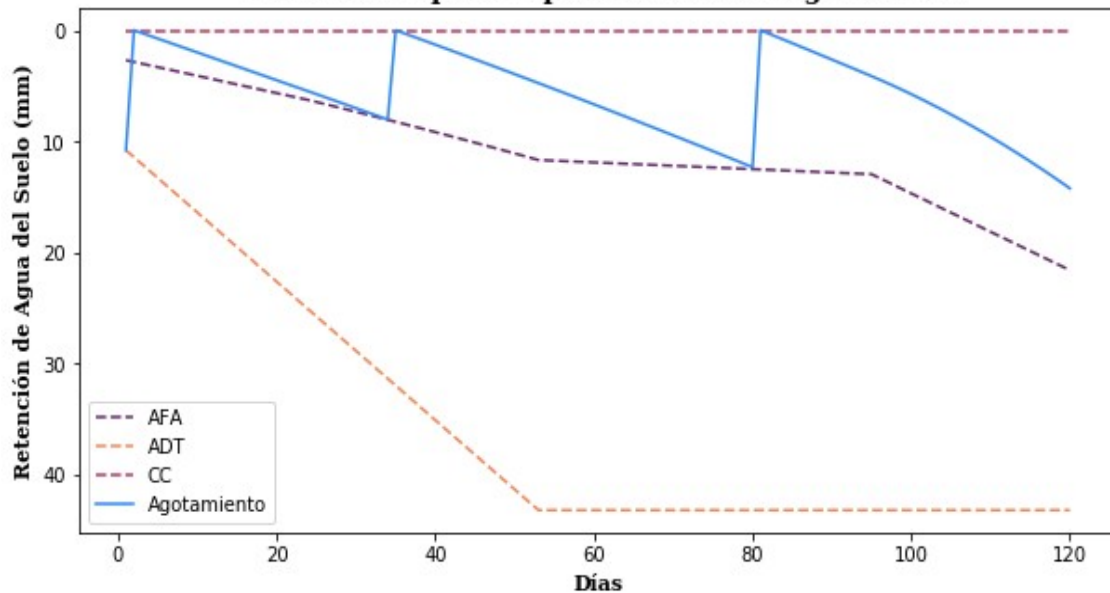
Programación de riego para el cultivo de Papa2 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



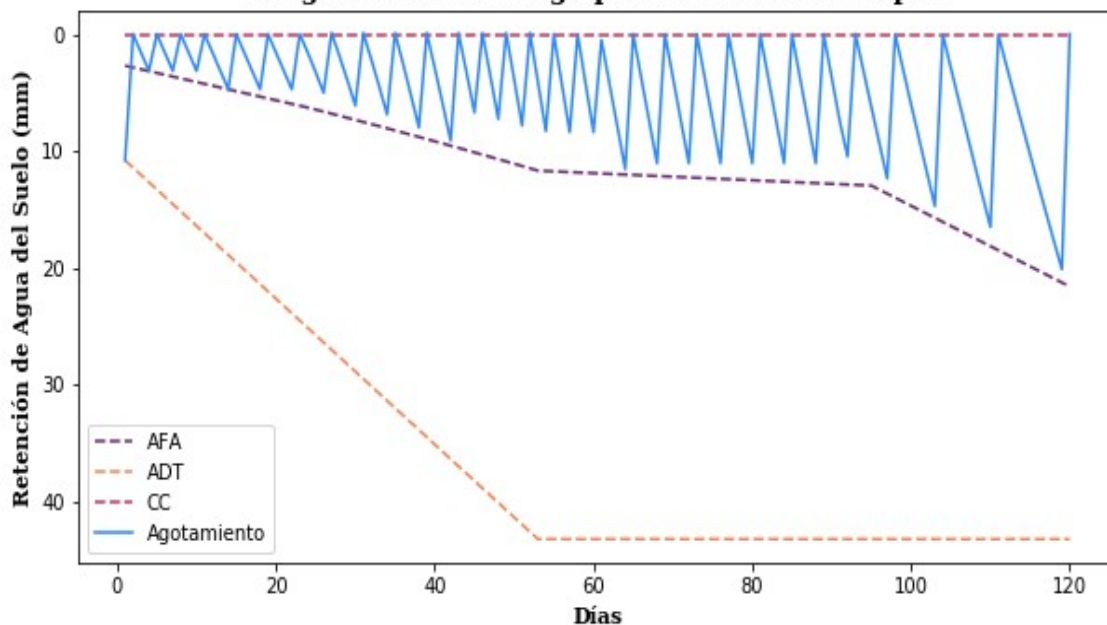
Programación de riego para el cultivo de Papa3



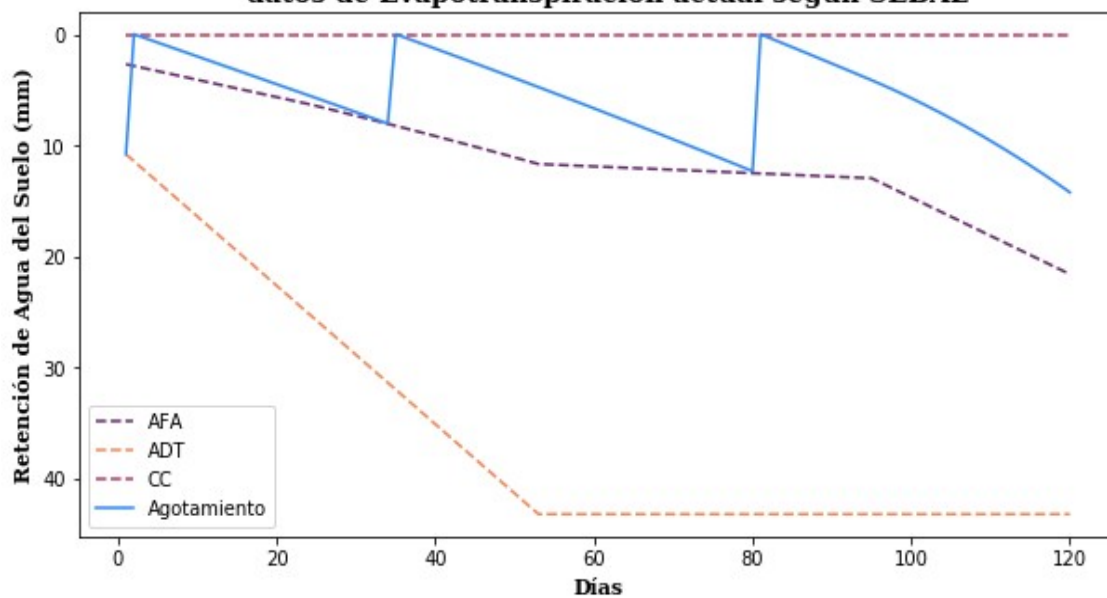
Programación de riego para el cultivo de Papa3 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



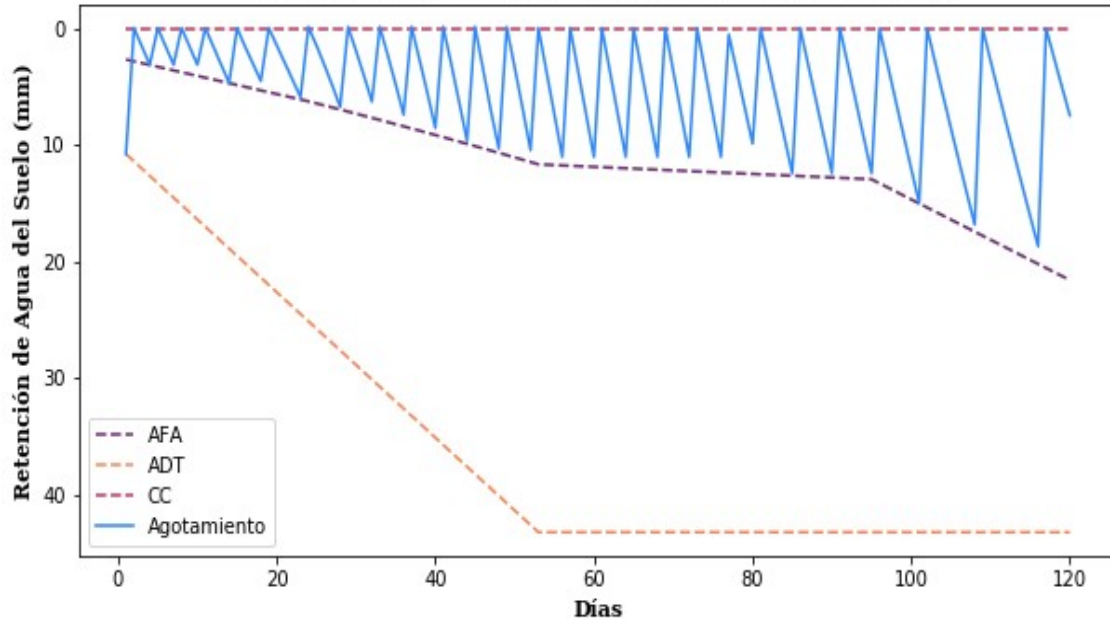
Programación de riego para el cultivo de Papa4



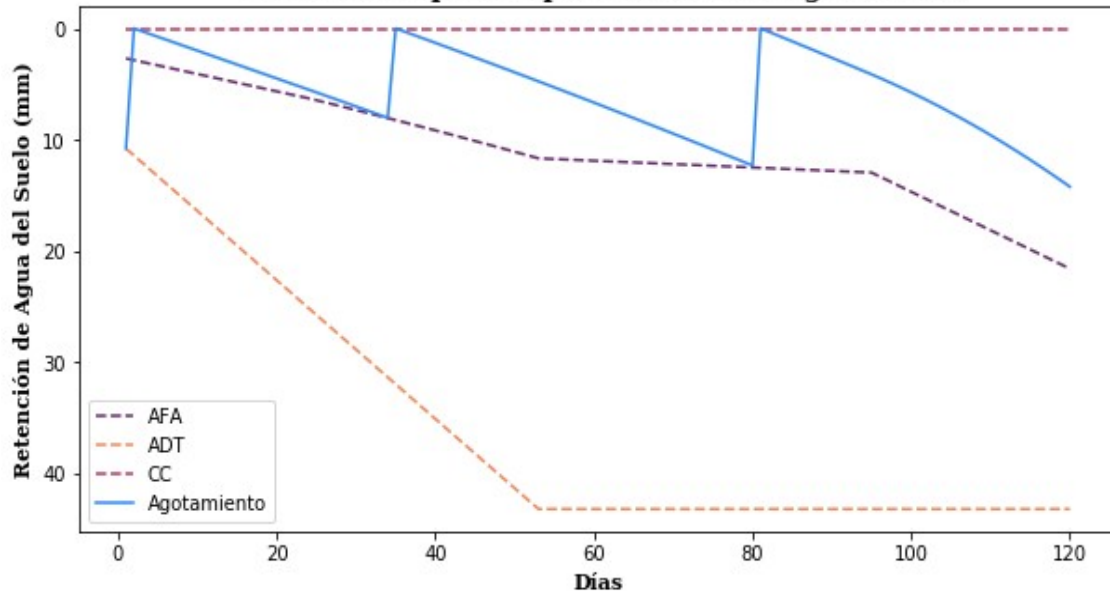
Programación de riego para el cultivo de Papa4 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



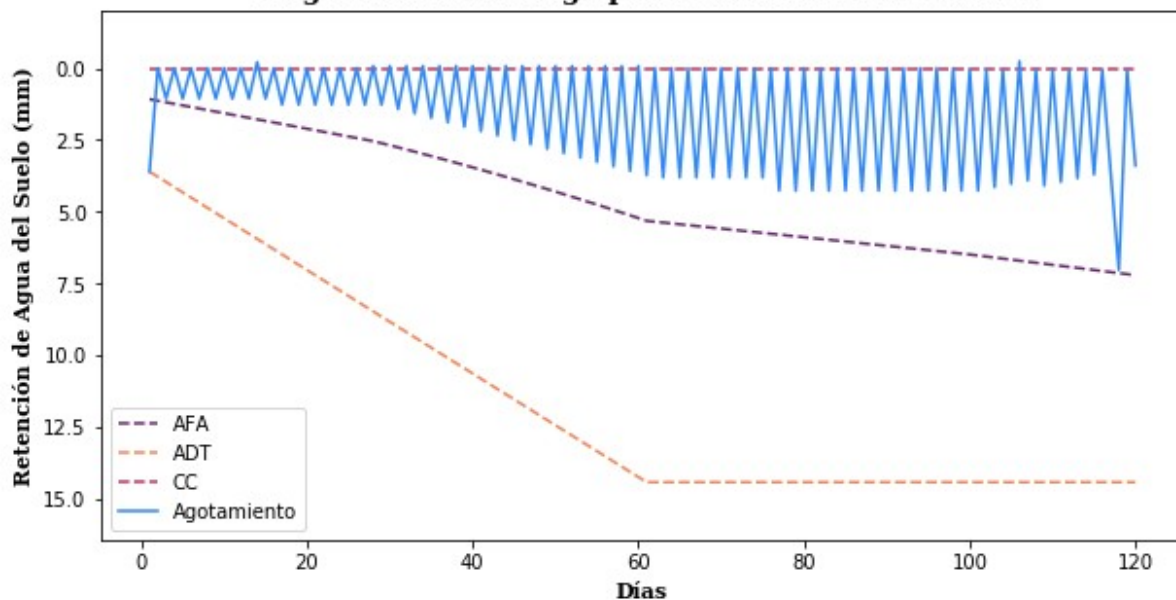
Programación de riego para el cultivo de Papa5



Programación de riego para el cultivo de Papa5 con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL



Programación de riego para el cultivo de Zanahoria



Programación de riego para el cultivo de Zanahoria con datos de Evapotranspiración actual según SEBAL

