Escuela Politécnica Superior de Jaén
Grado en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA EL CÁLCULO DE MINICENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN TRAMOS NO AFORADOS

Alumno: Andrés López Fernández

Tutor: Prof. D. Blas Ogayar Fernández
Dpto: Departamento Ingeniería eléctrica

JUNIO, 2015

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y a la vez apoyado a lo largo de estos años de universidad.

En primer lugar, agradecer a mis padres y mi hermana ya que me han apoyado y animado a esforzarme en lo que hago y han sido un ejemplo a seguir. Si no hubiese sido por ellos, no estaría aquí.

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a Blas Ogayar Fernández, tutor de este Trabajo Fin de Grado, ya que sin sus aportaciones no hubiese sido posible la redacción y ejecución del mismo. Me ha ayudado desde su experiencia a darle un sentido práctico y teórico a este proyecto.

Agradecer a mis profesores, en especial al departamento de ingeniería eléctrica, por su calidad docente y humana. Y sin olvidarme de mis compañeros, he de agradecer un gran compañerismo y amistad.

A todos, gracias.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como finalidad la evaluación del recurso hídrico en cuencas no aforadas, es decir, nos permitirá realizar el cálculo del caudal medio anual en un punto del río sin aforamientos, utilizando únicamente datos meteorológicos y características de la cuenca de captación, dichos datos, serán obtenidos para nuestro estudio de sistemas de información geográfica y bases de datos, todos públicos y de libre acceso. Y en la herramienta de cálculo aparte de los sistemas de información geográfica y bases de datos que sería el camino más rápido, se podrán utilizar datos de equipos de medición como se detallará en los sucesivos capítulos.

Implementándose para ello una metodología fundamentada en ecuaciones de carácter empírico. Se pretende realizar una herramienta de cálculo sencilla de utilizar pero que nos calcule nuestro caudal medio anual por medio de todos los métodos importantes de cálculo de caudal en tramos no aforados, para obtener así una fiabilidad en los resultados obtenidos, la necesidad de implementar todos los métodos importantes también reside en que aunque comparten datos en común en sus desarrollos todos toman datos diferentes, lo cual nos ayudará a validar y a verificar que no hemos tomado ningún dato erróneo.

La característica más singular necesaria para el cálculo de caudal en tramos no aforados será la evapotranspiración, en nuestro proyecto vamos a tener que analizar todas las características que influyen en la transpiración, infiltración, escurrimiento y evaporación. Es decir, todos los caminos posibles que puede seguir el agua.

Finalmente, se aplicará la metodología desarrollada al Estudio de Rehabilitación de 18 Centrales mini hidráulicas realizado años atrás por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Jaén en la provincia de Jaén, contrastando experimentalmente los resultados que nos proporciona nuestra herramienta de cálculo con los del estudio realizado por la Universidad de Jaén, a modo de validación del modelo.

Disponemos pues, de una herramienta completa, fácil y fiable que nos permitirá evaluar la posibilidad de colocar una central mini hidráulica, sin necesidad de estar sobre el terreno y sin mediciones, lo cual reduce los costes del estudio y aporta una gran rapidez, solo tenemos que buscar e introducir los datos tal y como irá pidiéndonos la propia herramienta y esta misma nos imprimirá un informe con el caudal buscado.

ABSTRACT

This Final Project takes as a purpose the evaluation of water resources in ungauged basins, so it allow us to calculate the average annual flow at one point the river without flow measures, using only meteorological data and characteristics of the catchment, whose data will be obtained for our study of geographic information systems and databases, all public and freely available. And in the calculation tool apart from geographical information systems and databases that would be the fastest way, you could use data from measuring equipment as it will be detailed in subsequent chapters.

It has been added a methodology based on empirical equations. The aim is to make a tool of calculation easy to use but that calculates us our average annual flow through all important methods for calculating flow in sections unmeasured, to obtain reliability in the obtained results, the need to implement all the important methods also is owed in that though they share common data in their developments they all take different data, which will help us to validate and verify that we have not made any mistake.

The most unique feature necessary for calculating flow in ungauged sections will be evapotranspiration, in our project we will have to analyze all the characteristics that influence the transpiration, infiltration, runoff and evaporation. So all possible ways that the water can follow.

Finally, the methodology developed will be applied to study Rehabilitation of 18 small hydroelectric power plants which were made by the Department of Electrical Engineering in the University of Jaén in the province of Jaen, contrasting experimental results provided by our calculation tool to apply the study by the University of Jaen, for model validation.

All in all, we have a complete, easy and reliable tool that allow us evaluate the possibility of placing a small hydroelectric power plant, without being on the ground and without measurements, which reduces the costs of the study and provides great speed, we only have to find and enter the data as it will be asking our tool and it will print a report with the flow rate sought.

CONTENIDO

RESUMEN 3
ABSTRACT 4
1.1 CONTEXTO 16
1.2 MOTIVACIÓN 17
1.3 OBJETO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 18
1.4 METODOLOGÍA 19
1.5 ESTRUCTURA 19
2. DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS 22
2.1 EL AGUA Y SU UTILIZACIÓN. 23
2.2 CICLO HIDROLÓGICO 25
3. ESCENARIOS DE CÁLCULO Y ENFOQUE METODOLÓGICO 27
3.1. INTRODUCCIÓN 27
3.2. CLASIFICACIÓN 27
3.2.1. Tramos aforados 27
3.2.2 Tramos cuasi-aforados 27
3.2.3. Tramos no aforados 28
4. LA CUENCA HIDROLÓGICA 30
4.1 CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS 31
4.2 CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE CURVAS ISOCRONAS 32
4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS 34
4.3.1 Área 34
4.3.2 Pendiente 34
4.3.3 Elevación media 36
4.3.4 Red de drenaje 37
4.3.5 Pendiente del cauce 38
4.3.6 Área – Elevación 41
4.3.7 Densidad hidrográfica 42
4.3.8 Centro de gravedad 42
4.3.9 Longitud de un río 42
4.3.10 Cociente de sinuosidad topográfica 43
4.3.11 Cociente de sinuosidad hidráulica 43
4.3.12 Perfil longitudinal del río principal 43
4.3.13 Potencia característica de un río 44
4.4 USO DEL SUELO, COBERTURA VEGETAL Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA 45
5. PRECIPITACIÓN 53
5.1 NOCIONES DE METEOROLOGÍA 53
5.2 NATURALEZA DE LA PRECIPITACIÓN 55

5.3 GENERACIÓN DE PRECIPITACIÓN 55
5.4 MEDICIÓN DE PRECIPITACIÓN 57
5.5 HIETOGRAMA 58
5.6 PRECIPITACIÓN MEDIA 59
5.7 MÉTODOS PARA LA DEDUCCIÓN DE DATOS FALTANTES 59
6. ESCURRIMIENTO 61
6.1 PROCESO DEL ESCURRIMIENTO 61
6.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESCURRIMIENTO 61
6.3 COMPONENTES DEL ESCURRIMIENTO 61
6.4 CÁLCULO DE LA ESCORRENTIA ANUAL 62
7. EVAPORACIÓN, TRANSPIRACIÓN E INFILTRACIÓN 65
7.1. PROCESO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN 65
7.1.1. Evaporación 65
7.1.2. Transpiración 72
7.1.3. Evapotranspiración (ET) 72
7.2. UNIDADES 73
7.3. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN 74
7.3.1. Variables climáticas 74
7.3.2. Factores de cultivo 74
7.3.3. Manejo y condiciones ambientales 75
7.4. FACTORES METEOROLÓGICOS QUE DETERMINAN LA ET 75
7.4.1 Radiación solar 76
7.4.1.1 Radiación extraterrestre (Ra) 76
7.4.1.2 Radiación solar o de onda corta (Rs) 76
7.4.1.3 Radiación relativa de onda corta (Rs/Rso) 77
7.4.1.4 Duración solar relativa (n/N) 77
7.4.1.5 Albedo (α) y radiación neta solar (Rns) 77
7.4.1.6 Radiación neta de onda larga (Rnl) 78
7.4.1.7 Radiación neta (Rn) 78
7.4.1.8 Flujo de calor del suelo 79
7.4.1.9 Unidades 79
7.4.1.10 Medición 80
7.4.1.11 Procedimientos de cálculo 80
7.4.2 Temperatura del aire 87
7.4.3 Velocidad del viento 88
7.4.3.1 Medición 89
7.4.3.2 Relación del viento con la altura 89
7.4.4 Constante psicrométrica (γ) 90
7.4.5 Presión atmosférica (P) 90

7.4.6 Humedad del aire 90
7.4.6.1 Presión de vapor 91
7.4.6.2 Temperatura del punto de rocío 92
7.4.6.3 Humedad absoluta 92
7.4.6.4 Humedad relativa 93
7.4.6.5 Medición humedad 93
7.4.6.6 Procedimientos de cálculo 94
8. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN 99
8.1 METODOLOGÍA 99
8.1.1 Métodos directos 100
8.1.2 Métodos indirectos 105
8.1.3 Métodos meteorológicos 112
9. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO 115
9.1 DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO 115
9.1.1 Recopilación de datos mediante sistemas de información geográfica y tablas 117
9.2 MÉTODOS METEOROLÓGICOS APLICADOS 117
9.2.1 Método de Turc 117
9.2.2 Método de Coutagne 118
9.2.3 Método de Thornthwaite 118
9.2.4 Método de Hargreaves 119
9.2.5 Método de Hargreaves simplificado 120
9.2.6 Método de makkink 120
9.2.7 Método de Blaney-Criddle 121
9.2.8 Método de Papadakis 124
9.2.9 Método de Ivanov 126
9.2.10 Método de Haude 127
9.2.11 Método de Jensen-Haise 127
9.2.12 Método de Pennan 130
9.3 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO ANUAL 132
10. DESARROLLO EN EXCEL DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO 135
10.1 INTRODUCCIÓN 135
10.2 TABLA RESUMEN 137
10.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO 141
10.4 INSERTAR DATOS DE CÁLCULO 143
10.5 RESULTADOS 150
10.6 ANEXOS 155
10.7 RESUMEN 162
11. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN 165
11.1 Central Casas Nuevas. Marmolejo 166

11.1.1 Situación y Descripción de la Central 166
11.1.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 168
11.1.3 Comparación de Resultados 171
11.2 Central Nuestra Señora de los Ángeles. Campillo de Arenas 171
11.2.1 Situación y Descripción de la Central 171
11.2.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 173
11.2.3 Comparación de Resultados 176
11.3 Central Valdepeñas. Valdepeñas de Jaén 176
11.3.1 Situación y Descripción de la Central 176
11.3.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 178
11.3.3 Comparación de Resultados 181
11.4 Central Río Frío. Los Villares 181
11.4.1 Situación y Descripción de la Central 181
11.4.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 183
11.4.3 Comparación de Resultados 186
11.5 Central Purísima Concepción. Mengíbar 186
11.5.1 Situación y Descripción de la Central 186
11.5.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 188
11.5.3 Comparación de Resultados 191
11.6 Central Puente del Obispo. Begíjar 191
11.6.1 Situación y Descripción de la Central 191
11.6.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 193
11.6.3 Comparación de Resultados 196
11.7 Central Santal Isabel. Torres 196
11.7.1 Situación y Descripción de la Central 196
11.7.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 198
11.7.3 Comparación de Resultados 201
11.8 Central Mata Begid. Cambil 201
11.8.1 Situación y Descripción de la Central 201
11.8.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 203
11.8.3 Comparación de Resultados 206
11.9 Central San Cayetano. Arbuniel (Cambil) 206
11.9.1 Situación y Descripción de la Central 206
11.9.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 208
11.9.3 Comparación de Resultados 211
11.10 Central Junta de los Ríos. Cambil 211
11.10.1 Situación y Descripción de la Central 211
11.10.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 213
11.10.3 Comparación de Resultados 216

11.11 Central San Manuel. Cambil 216
11.11.1 Situación y Descripción de la Central 216
11.11.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 218
11.11.3 Comparación de Resultados 221
11.12 Central Electra Guzmán. Cambil 221
11.12.1 Situación y Descripción de la Central 221
11.12.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 223
11.12.3 Comparación de Resultados 226
11.13 Central Nuestra Señora de Tiscar. Quesada 226
11.13.1 Situación y Descripción de la Central 226
11.13.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 228
11.13.3 Comparación de Resultados 231
11.14 Central Cerrada del Utrero. Cazorla 231
11.14.1 Situación y Descripción de la Central 231
11.14.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 233
11.14.3 Comparación de Resultados 236
11.15 Central Las Chozuelas. Villanueva del Arzobispo 236
11.15.1 Situación y Descripción de la Central 236
11.15.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 238
11.15.3 Comparación de Resultados 241
11.16 Central La Toba. Santiago – Pontones 241
11.16.1 Situación y Descripción de la Central 241
11.16.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 243
11.16.3 Comparación de Resultados 246
11.17 Central Trujala. Segura de la Sierra 246
11.17.1 Situación y Descripción de la Central 246
11.17.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 248
11.17.3 Comparación de Resultados 251
11.18 Central Electra San Juan. Puente de Génave 251
11.18.1 Situación y Descripción de la Central 251
11.18.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual 253
11.18.3 Comparación de Resultados 256
12.1 RESUMEN DE RESULTADOS 258
12.2 EVALUACIÓN DE ERRORES 269
13 CONCLUSIONES 271
REFERENCIAS 273

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Evolución producción mini hidráulica **17**
Fig. 2. Ciclo hidrológico **25**
Fig. 3. Ciclo completo del agua **25**
Fig. 4. Representación de una cuenca hidrográfica. **31**
Fig. 5. Límites de una cuenca **31**
Fig. 6. Método de puntos aleatorios para trazar la red de isócronas **33**
Fig. 7. Cuenca mallada **35**
Fig. 8. Red de drenaje **37**
Fig. 9. Pendiente del Río Oro (Springal, 1970) **39**
Fig. 10. Perfil longitudinal del cauce **39**
Fig. 11. Perfil longitudinal del cauce **41**
Fig. 12. Carta topográfica **42**
Fig. 13. Imagen real cuenca **42**
Fig. 14. Cálculo de la pendiente media de un río **43**
Fig. 15. Perfil longitudinal de un río **44**
Fig. 16 Cuenca con diferentes tipos de suelo **51**
Fig. 17. Masas de aire **56**
Fig. 18. Pluviómetro **57**
Fig. 19. Pluviógrafo **58**
Fig. 20. Reparto de la evapotranspiración **66**
Fig. 21. Tanque de evaporación **69**
Fig. 22. Evaporímetro. Tanque clase A **70**
Fig. 23. Evaporímetro de Piché. **71**
Fig. 24. Factores que afectan a la evapotranspiración **74**
Fig. 25. Variación anual de las horas de luz del día **78**
Fig. 26. Componentes de la radiación **79**
Fig. 27. Efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración **88**
Fig. 28. Factor de conversión velocidad del viento **89**
Fig. 29. Presión de vapor en función de la temperatura **92**
Fig. 30. Variación de la humedad relativa **93**
Fig. 31. Evapotranspirómetro **100**
Fig. 32. Lisímetro **102**
Fig. 33. Lisímetros de drenaje **102**
Fig. 34. Atmómetro de Livingstone **104**
Fig. 35. Representación variación componentes balance de energía **105**
Fig. 36. Medidores de radiación global y neta **107**
Fig. 37. Cúpula de silicona de un radiómetro de radiación neta **107**
Fig. 38. Balance de agua en el suelo de la zona radicular **111**
Fig. 39. Interfaz herramienta de cálculo **137**
Fig. 40. Hoja Procedimiento de cálculo. Herramienta de cálculo **142**
Fig. 41. Panel de información general **142**
Fig. 42. Hoja Inserción de datos. Herramienta de cálculo **143**
Fig. 43. Panel. Inserción datos 1s **144**
Fig. 44. Panel de insertar datos. Principales variables **145**
Fig. 45. Panel inserción datos. Datos insertados desde base de datos **145**
Fig. 46. Panel. Datos insertados manualmente **146**
Fig. 47. Panel. Inserción temperatura media mensual **146**
Fig. 48. Panel. Inserción temperatura ambiente media **147**
Fig. 49. Panel. Inserción temperatura ambiente media **147**
Fig. 50. Panel. Selección de región **148**
Fig. 51. Panel. Inserción datos 2 ..... **148**

Fig. 52. Barra de progreso **149**
Fig. 53. Central Casas Nuevas **166**
Fig. 54. Situación Central Casas Nuevas **167**
Fig. 55. Esquema Central Casas Nuevas **167**
Fig. 56. Cuenca de Captación de la Central Casas Nuevas **168**
Fig. 57. Panel. Inserción datos 3 ..... **168**
Fig. 58. Central Nuestra Señora de los Ángeles **171**
Fig. 59. Situación Central Nuestra Señora de los Ángeles **172**
Fig. 60. Esquema Central Nuestra Señora de los Ángeles **172**
Fig. 61. Cuenca de Captación de la Central Nuestra Señora de los Ángeles **173**
Fig. 62. Panel. Inserción datos 4 ..... **173**
Fig. 63. Central Valdepeñas **176**
Fig. 64. Situación Central Valdepeñas **177**
Fig. 65. Esquema Central Valdepeña **177**
Fig. 66. Cuenca de Captación de la Central Valdepeñas **178**
Fig. 67. Panel. Inserción datos 5 ..... **178**
Fig. 68. Central Río Frío **181**
Fig. 69. Situación Central Río Frío **182**
Fig. 70. Esquema Central Río Frío **182**
Fig. 71. Cuenca de Captación de la Central Río Frío **183**
Fig. 72. Panel. Inserción datos 6 ..... **183**
Fig. 73. Central Purísima Concepción **186**
Fig. 74. Situación Central Purísima Concepción **187**
Fig. 75. Esquema Central Purísima Concepción **187**
Fig. 76. Cuenca de Captación de la Central Purísima Concepción **188**
Fig. 77. Panel. Inserción datos 7 ..... **188**
Fig. 78. Central Puente del Obispo **191**
Fig. 79. Situación Central Puente del Obispo **192**
Fig. 80. Esquema Central Puente del Obispo **192**
Fig. 81. Cuenca de Captación de la Central Puente del Obispo **193**
Fig. 82. Panel. Inserción datos 8 ..... **193**
Fig. 83. Central Santa Isabel **196**
Fig. 84. Situación Central Santa Isabel **197**
Fig. 85. Esquema Central Santa Isabel **197**
Fig. 86. Cuenca de Captación de la Central Santa Isabel **198**
Fig. 87. Panel. Inserción datos 9 ..... **198**
Fig. 88. Central Mata Begid **201**
Fig. 89. Situación Central Mata Begid **202**
Fig. 90. Esquema Central Mata Begid **202**
Fig. 91. Cuenca de Captación de la Central Mata Begid **203**
Fig. 92. Panel. Inserción datos 10 ..... **203**
Fig. 93. Central San Cayetano **206**
Fig. 94. Situación Central San Cayetano **207**
Fig. 95. Esquema Central San Cayetano **207**
Fig. 96. Cuenca de Captación de la Central San Cayetano **208**
Fig. 97. Panel. Inserción datos 11 ..... **208**
Fig. 98. Central Junta de los Ríos **211**
Fig. 99. Situación Central Junta de los Ríos **212**
Fig. 100. Esquema Central Junta de los Ríos **212**
Fig. 101. Cuenca de Captación de la Central Junta de los Ríos **213**
Fig. 102. Panel. Inserción datos 12 ..... **213**
Fig. 103. Central San Manuel **216**
Fig. 104. Situación Central San Manuel **217**
Fig. 105 Esquema Central San Manuel **217**

Fig. 106. Cuenca de Captación de la Central San Manuel **218**
Fig. 107. Panel. Inserción datos 13 ..... **218**
Fig. 108. Central Electra Guzmán **221**
Fig. 109. Situación Central Electra Guzmán **222**
Fig. 110. Esquema Central Electra Guzmán **222**
Fig. 111. Cuenca de Captación de la Central Electra Guzmán **223**
Fig. 112. Panel. Inserción datos 14 ..... **223**
Fig. 113. Central Nuestra Señora de Tiscar **226**
Fig. 114. Situación Central Nuestra Señora de Tiscar **227**
Fig. 115. Esquema Central Nuestra Señora de Tiscar **227**
Fig. 116. Cuenca de Captación de la Central Nuestra Señora de Tiscar **228**
Fig. 117. Panel. Inserción datos 15 ..... **228**
Fig. 118. Central Cerrada del Utrero **231**
Fig. 119. Situación Central Cerrada del Utrero **232**
Fig. 120. Esquema Central Cerrada del Utrero **232**
Fig. 121. Cuenca de Captación de la Central Cerrada del Utrero **233**
Fig. 122. Panel. Inserción datos 16 ..... **233**
Fig. 123. Central Las Chozuelas **236**
Fig. 124. Situación Central Las Chozuelas **237**
Fig. 125. Esquema Central Las Chozuelas **237**
Fig. 126. Cuenca de Captación de la Central Las Chozuelas **238**
Fig. 127. Panel. Inserción datos 17 ..... **238**
Fig. 128. Central La Toba **241**
Fig. 129. Situación Central La Toba **242**
Fig. 130. Esquema Central La Toba **242**
Fig. 131. Cuenca de Captación de la Central La Toba **243**
Fig. 132. Panel. Inserción datos 18 ..... **243**
Fig. 133. Central Trujala **246**
Fig. 134. Situación Central Trujala **247**
Fig. 135. Esquema Central Trujala **247**
Fig. 136. Cuenca de Captación de la Central Trujala **248**
Fig. 137. Panel. Inserción datos 19 ..... **248**
Fig. 138. Central Electra San Juan **251**
Fig. 139. Situación Central Electra San Juan **252**
Fig. 140. Esquema Central Electra San Juan **252**
Fig. 141. Cuenca de Captación de la Central Electra San Juan **253**
Fig. 142. Panel. Inserción datos 20 ..... **253**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencia instalada UE. Centrales menores de 10MW **12**
Tabla 2. Porcentajes de agua **24**
Tabla 3. Valores del coeficiente escurrimiento **46**
Tabla 4. Para seleccionar el coeficiente de escurrimiento C **47**
Tabla 5. Coeficiente de escurrimiento de acuerdo a la topografía **47**
Tabla 6. Coeficiente C en función del tipo de suelo **48**
Tabla 7. Tipos de suelos según la SCS de los E.U **48**
Tabla 8. Número de escurrimiento N. **49**
Tabla 9. Determinación del tipo de suelo. **50**
Tabla 10. Corrección de valor ´´N`` **50**
Tabla 11. Evaporación desde un suelo saturado **67**
Tabla 12. Evapotranspiración anual para diferentes regiones **68**
Tabla 13. Factores de conversión para expresar evapotranspiración 1 ..... **73**
Tabla 14. Factores de conversión para expresar evapotranspiración 2 ..... **80**
Tabla 15. Coeficiente reductor ´´f`` **108**
Tabla 16. Valores de albedo para distintas superficies evaporantes **108**
Tabla 17. Datos meteorológicos de una estación meteorológica **109**
Tabla 18. Relación Δ/γ en función de la temperatura del aire (t) **121**
Tabla 19. Porcentaje horas-luz día para cada mes del año **123**
Tabla 20. Coeficiente para el cultivo **124**
Tabla 21. Tensión de vapor de saturación en función de la temperatura **125**
Tabla 22. Radiación extraterrestre para el hemisferio norte **129**
Tabla 23. Valores del coeficiente C de Pennan **131**
Tabla 24. Tabla resumen de los métodos implementados **141**
Tabla 25. Datos iniciales de partida **150**
Tabla 26. Tabla. Desarrollo individual y cálculo de cada método **155**
Tabla 27. Tabla. Anexos herramienta de cálculo **161**
Tabla 28. Datos iniciales de partida Central de Casas Nuevas **169**
Tabla 29. Tabla resumen caudales en la Central de Casas Nuevas **170**
Tabla 30. Comparación de Resultados de Caudal de la Central de Casas Nuevas **171**
Tabla 31. Datos iniciales de partida en la Central Nuestra Señora de los Ángeles **174**
Tabla 32. Resultados de Caudal de la Central de Nuestra Señora de los Ángeles **175**
Tabla 33. Comparación Resultados Caudal Central Ntra. Sra. de los Ángeles **176**
Tabla 34. Datos iniciales de partida en la Central Valdepeñas **179**
Tabla 35. Resultados de Caudal de la Central Valdepeñas **180**
Tabla 36. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Valdepeñas **181**
Tabla 37. Datos iniciales de partida en la Central de Río Frío **184**
Tabla 38. Resultados de Caudal de la Central Río Frío **185**
Tabla 39. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Río Frío **186**
Tabla 40. Datos iniciales de partida en la Central Purísima Concepción **189**
Tabla 41. Resultados de Caudal de la Central Purísima Concepción **190**
Tabla 42. Comparación Resultados Caudal Central Purísima Concepción **191**
Tabla 43. Datos iniciales de partida en la Central Puente del Obispo **194**
Tabla 44. Resultados de Caudal de la Central Puente del Obispo **195**
Tabla 45. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Puente del Obispo **196**
Tabla 46. Datos iniciales de partida en la Central Santa Isabel **199**
Tabla 47. Resultados de Caudal de la Central Santa Isabel **200**
Tabla 48. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Santa Isabel **201**
Tabla 49. Datos iniciales de partida en la Central Mata Begid **204**
Tabla 50. Resultados de Caudal de la Central Mata Begid **205**
Tabla 51. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Mata Begid **206**

Tabla 52. Datos iniciales de partida de la Central San Cayetano **209**
Tabla 53. Resultados de Caudal de la Central San Cayetano **210**
Tabla 54. Comparación de Resultados de Caudal de la Central San Cayetano **211**
Tabla 55. Datos iniciales de partida de la Central Junta de los Ríos **214**
Tabla 56. Resultados de Caudal de la Central Junta de los Ríos **215**
Tabla 57. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Junta de los Río **216**
Tabla 58. Datos iniciales de partida de la Central San Manuel **219**
Tabla 59. Resultados de Caudal de la Central San Manuel **220**
Tabla 60. Comparación de Resultados de Caudal de la Central San Manuel **221**
Tabla 61. Datos de partida de la Central Electra Guzmán **224**
Tabla 62. Resultados de Caudal de la Central Electra Guzmán **225**
Tabla 63. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Electra Guzmán **226**
Tabla 64. Datos iniciales de partida de la Central Nuestra Señora de Tiscar **229**
Tabla 65. Resultados de Caudal de la Central Nuestra Señora de Tiscar **230**
Tabla 66. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Ntra. Sra. de Tiscar **231**
Tabla 67. Datos iniciales de partida de la Central Cerrada del Utrero **234**
Tabla 68. Resultados de Caudal de la Central Cerrada del Utrero **235**
Tabla 69. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Cerrada del Utrero **236**
Tabla 70. Datos iniciales de partida de la Central Las Chozuelas **239**
Tabla 71. Resultados de Caudal de la Central Las Chozuelas **240**
Tabla 72. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Las Chozuelas **241**
Tabla 73. Datos iniciales de partida de la Central La Toba **244**
Tabla 74. Resultados de Caudal de la Central La Toba **245**
Tabla 75. Comparación de Resultados de Caudal de la Central La Toba **246**
Tabla 76. Datos iniciales de partida de la Central Trujala **249**
Tabla 77. Resultados de Caudal de la Central Trujala **250**
Tabla 78. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Trujala **251**
Tabla 79. Datos iniciales de partida de la Central Electra San Juan **254**
Tabla 80. Resultados de Caudal de la Central Electra San Juan **255**
Tabla 81. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Electra San Juan **256**
Tabla 82. Caudales calculados para Central Casas Nuevas. Marmolejo..... **258**
Tabla 83. Caudales calculados para Central Nuestra Señora de los Ángeles **259**
Tabla 84. Caudales calculados para *Central Valdepeñas* **259**
Tabla 85. Caudales calculados para *Central Río Frío* **260**
Tabla 86. Caudales calculados para *Central Purísima Concepción* **260**
Tabla 87. Caudales calculados para *Central Puente del Obispo* **261**
Tabla 88. Caudales calculados para *Central Santa Isabel* **261**
Tabla 89. Caudales calculados para *Central Mata Begid* **262**
Tabla 90. Caudales calculados para *Central San Cayetano* **262**
Tabla 91. Caudales calculados para *Central Junta de los Ríos* **263**
Tabla 92. Caudales calculados para *Central San Manuel* **263**
Tabla 93. Caudales calculados para *Central Electra Guzmán* **264**
Tabla 94. Caudales calculados para *Central Nuestra Señora de Tiscar* **264**
Tabla 95. Caudales calculados para *Central Cerrada de Utrero* **265**
Tabla 96. Caudales calculados para *Central Las Chozuelas* **265**
Tabla 97. Caudales calculados para *Central La Toba* **266**
Tabla 98. Caudales calculados para *Central Trujala* **266**
Tabla 99. Caudales calculados para *Central Electra San Juan* **267**
Tabla 100. Resumen de Resultados **268**
Tabla 101. Evaluación de errores **269**
Tabla 102. Frecuencia métodos **269**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

Contexto **16**
Motivación **17**
Objeto y justificación **18**
Metodología **19**
Estructura **19**

1.1 CONTEXTO

Para comenzar este Trabajo Fin de Grado, analizamos el contexto en el que nos encontramos, este proyecto surge de una necesidad y un potencial a nivel minihidráulico importante con el que cuenta nuestro país y países de nuestro entorno, como analizaremos a continuación.

España ocupa un papel destacado en el área hidroeléctrica a nivel europeo, situándose en tercer lugar respecto al resto de países de la Unión Europea en cuanto a potencia hidroeléctrica instalada con centrales menores de 10 MW y en el cuarto lugar en cuanto a centrales de potencia superior a 10 MW.

País	Potencia (MW)	Producción (GWh)
Italia	2605	9159
Francia	2049	6924
España	1872	3031
Alemania	1403	7002
Austria	1179	4816
Suecia	916	5033
Rumania	353	508
Portugal	335	520
Finlandia	316	1616
República Checa	292	966
Polonia	247	895
Bulgaria	225	688
Reino Unido	173	576
Grecia	158	325
Eslovenia	155	457
Bélgica	103	386
Eslovaquia	90	166
Resto UE	145	473
Total	**12618**	**43545**

Tabla 1. Potencia total instalada en la UE (2009). Centrales menores de 10MW.

En la actualidad, la tendencia europea por lo que respecta al desarrollo de la capacidad de las centrales menores de 10 MW no es muy dinámica, debido a los obstáculos administrativos y medioambientales existentes. No obstante, el sector tiene un potencial real que puede generar una actividad económica constante y próspera.

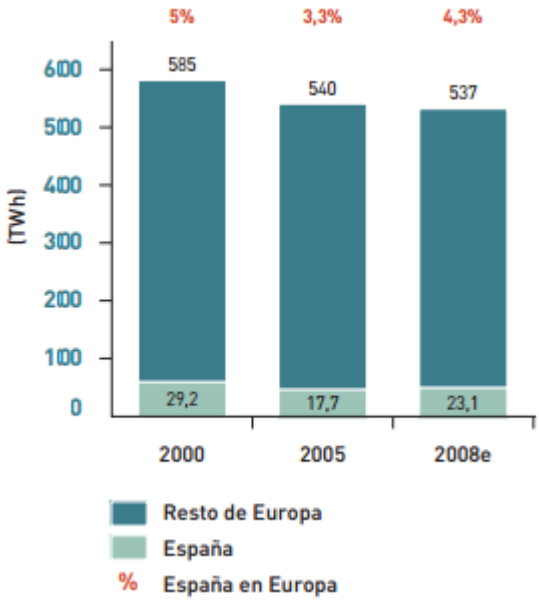


Fig. 1. Evolución producción de energía mini hidráulica en España y en Europa.

España cuenta con un importante y consolidado sistema de generación hidroeléctrica, como resultado de una larga tradición histórica en el desarrollo de aprovechamientos hidroeléctricos, debido a la orografía del país y a la existencia de un gran número de presas, con una capacidad total en embalses de 55000 hm^3, de los cuales el 40% de esa capacidad embalsable corresponde a embalses hidroeléctricos, que es una de las proporciones más altas de Europa y el mundo.

España tiene un elevado potencial hidroeléctrico, gran parte del cual ha sido ya desarrollado a lo largo de más de un siglo, dando como resultado un importante y consolidado sistema de generación hidroeléctrica altamente eficiente. No obstante hay un hueco para la mini hidráulica importante, actualmente no se apuesta por esta energía pero el potencial está ahí, es viable y es un presente y futuro.

1.2 MOTIVACIÓN

Una vez expuesto el contexto en el que se encuentra nuestro país y nuestro entorno respecto a la energía hidroeléctrica, se tiene presente que se dan todas las circunstancias para la implantación de centrales minihidráulicas en un futuro próximo. La tecnología ha alcanzado una madurez, es una de las energías renovables más limpias y respetuosas con el medio ambiente y puede solucionar problemas de abastecimiento en zonas aisladas del sistema.

Si entramos en la página web de Cedex para acceder a las estaciones de aforos de las distintas confederaciones hidrográficas, podemos comprobar que hay un buen aforamiento, pero en ríos de menor tamaño como arroyos no hay el suficiente aforamiento para obtener un caudal medio óptimo para poder analizar la posibilidad de implantar una central minihidráulica en cualquier punto. Se llega aquí a la conclusión de la importancia de acometer una herramienta de cálculo para poder solucionar dicho problema.

Se opta por realizar un programa en Excel, ya que es una herramienta de la que todos disponemos, y dicha herramienta nos permite realizar una programación en Visual Basic, que ha sido el lenguaje de programación implementado en nuestro proyecto.

La elaboración de una herramienta tan práctica y que nos proporciona unos datos fiables, me motivo aún más en la realización.

Aparte de la parte de programación, también he tenido que tratar con sistemas SIG para la obtención de datos e indagar en los numerosos conceptos que engloba el proyecto. Y sin olvidarme de la parte más importante que en parte justifica por si misma el proyecto, la parte matemática, la complejidad de cada método y la gran cantidad de datos que se manejan hace necesario tener una herramienta de cálculo.

1.3 OBJETO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado consiste evaluar el recurso hídrico en cuencas no aforadas, calcular el caudal medio anual en tramos donde no existen estaciones de aforos, mediante el uso de datos climatológicos extraídos de SIG, en nuestro caso hemos trabajado con las bases de datos de la junta de Andalucía para realizar un estudio de los métodos aplicados. Y también utilizando características de la cuenca de captación.

La situación de aforamiento hidrológica en España es la siguiente, hay un sistema de 9 confederaciones hidrográficas, las cuales disponen de los siguientes aforamientos:

- ✓ Confederación hidrográfica del Cantábrico 69.
- ✓ Confederación hidrográfica Miño-Sil 84.
- ✓ Confederación hidrográfica del Duero 166.
- ✓ Confederación hidrográfica del Tajo 205.
- ✓ Confederación hidrográfica del Guadiana 156.
- ✓ Confederación hidrográfica del Guadalquivir 129.
- ✓ Confederación hidrográfica Segura 76.
- ✓ Confederación hidrográfica Júcar 112.
- ✓ Confederación hidrográfica del Ebro 296.

Haciendo un total de 1293 estaciones de aforos. En España hay un total de 188 ríos y afluentes con más de 50 km, el sistema de aforamientos a avanzado tanto en número como en tecnología, los ríos disponen de un buen sistema de aforamiento en cualquier punto, pero el objeto de este proyecto es la implantación de centrales mini hidráulicas, y los puntos más interesantes de colocación de dichas centrales puede ser en sitios rurales o de sierra en los que la situación hídrica está formada por arroyos, en los que no siempre se dispone de aforamiento, o dicho aforamiento se encuentra lejos del punto de colocación de nuestra central mini hidráulica.

Se justifica pues la implantación de una herramienta de cálculo de caudales en tramos no aforados. Se ha de mencionar que la mini hidráulica es considerada como una de las mejores fuentes de energía renovable, y como se acaba de mencionar su uso en zonas rurales o de sierra puede satisfacer la demanda de electricidad en zonas aisladas del

sistema, siendo la mejor opción tanto en rendimiento como en reducción de emisiones de CO2.

Aplicando dicha herramienta conseguiremos obtener un caudal lo suficientemente fiable con la ausencia de estaciones de aforo, para afrontar la colocación de una central mini hidráulica.

1.4 METODOLOGÍA

En primer lugar se ha realizado un resumen de todas las variables y términos que intervienen en el cálculo del caudal ya sean meteorológicas como pueden ser la radiación, temperatura, precipitación, velocidad del viento, presión atmosférica o humedad relativa, geográficas como pueden ser el área de la cuenca hidrográfica o pendiente e incluso el tipo de vegetación para cálculos de transpiración en las plantas, no todas han sido objeto de la aplicación de la herramienta de cálculo, pero son necesarias para definir por completo el proyecto. La herramienta pretende mostrar el camino más práctico y efectivo para la obtención de nuestro caudal, tiene implementados métodos que engloban todo tipo de variables y siempre desde diferentes perspectivas o planteamientos. Se ha buscado realizar métodos con todos los tipos de variables posibles, para así no caer en errores técnicos de mediciones en alguna variable.

Una vez realizada la herramienta de cálculo de caudal para tramos no aforados, se procederá al estudio y comparación de los métodos aplicados, basándonos para ello en una serie de centrales minihidráulicas de Andalucía de las cuales ya conocemos los datos y el factor a comparar que en nuestro caso es el caudal, teniendo el caudal real del caso a estudiar, lo compararemos con los caudales obtenidos según cada método en nuestra herramienta de cálculo, obteniendo así el porcentaje de error para cada uno de ellos. Todo esto nos permitirá recomendar que método es más idóneo según la situación.

1.5 ESTRUCTURA

El Trabajo Fin de Grado se estructura en trece capítulos, en los que se desarrolla el fundamento teórico y análisis del tema así como su aplicación práctica.

En el Capítulo 2, se expone una introducción a la hidrología, el agua y su utilización, y al ciclo hidrológico responsable de la principal variable del cálculo del caudal en tramos no aforados, la evapotranspiración.

En el Capítulo 3, se exponen los distintos escenarios de cálculo para introducirnos al escenario que se va a plantear en este proyecto y el enfoque metodológico en cada uno de ellos.

En el Capítulo 4, se comienzan a definir los términos y cálculos necesarios para el cálculo de nuestro caudal, se define y desarrollan los conceptos de uno de los términos más importantes para nuestro proyecto, la cuenca hidrológica, la cual interviene desde en la

precipitación, escurrimiento o evapotranspiración luego es una variable muy transversal y de ahí la importancia de esta.

En el Capítulo 5, se desarrollan las nociones de meteorología necesarias para el proyecto, las posibilidades de medición de esta y cálculo de los datos faltantes.

En el Capítulo 6, se define el proceso de escurrimiento, componentes, factores que influyen y cálculo de este.

En el Capítulo 7, el más singular y significativo que lo diferencia del cálculo de caudal en cualquier otro escenario de cálculo, es el concepto de evapotranspiración, en este capítulo se definen las partes y los factores que afectan a la evapotranspiración.

En el Capítulo 8, se exponen los diferentes métodos para la determinación de la evapotranspiración, de los cuales utilizaremos los meteorológicos, ya que el resto de métodos aparte de ser muy caros en comparación con los meteorológicos, suponen elementos de medición de gran volumen, que requieren de una instalación y en definitiva quedan fuera del objeto de este proyecto.

En el Capítulo 9, se desarrolla la metodología implementada en la Herramienta de cálculo, donde se muestran que pasos hay que seguir para obtener el caudal.

En el Capítulo 10, se explica el funcionamiento de la Herramienta de cálculo, como se ha implementado, se detalla un manual de funcionamiento y en definitiva de desmenuza parte por parte.

En el Capítulo 11, se utiliza la Herramienta de cálculo en una serie de casos prácticos, con la finalidad de validar dicha herramienta y comparar los métodos empleados.

En el Capítulo 12, una vez realizado un estudio con nuestra Herramienta de cálculo, partimos de dichos resultados, para concluir que métodos son los más apropiados y terminar el proyecto haciendo una serie de propuestas para la selección final de nuestro caudal.

En el capítulo 13, se expone una lista de conclusiones que engloban todo el proyecto, y recomienda leerlas antes de la utilización de la herramienta de cálculo.

CAPÍTULO 2

DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

ÍNDICE

Definición y antecedentes históricos **22**
El agua y su utilización **23**
El ciclo hidrológico **25**

2. DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La hidrología estudia la ocurrencia, distribución movimiento y características del agua en la tierra y su relación con el medio ambiente. Desde sus inicios hasta la fecha, la hidrología ha evolucionados de una curiosidad meramente filosófica hasta convertirse en una disciplina científica que forma parte de las llamadas ciencias de la tierra como lo son la geología, la climatología, la meteorología y la oceanografía.

Los filósofos de la antigüedad centraron su atención en la naturaleza de los procesos generadores de corrientes superficiales y en otros fenómenos relacionados al origen y ocurrencia del agua en sus diversos estados. Homero, el filósofo griego, creía en la ocurrencia de grandes depósitos de agua subterránea que alimentaban los ríos, manantiales, lagos, mares y pozos profundos.

A pesar de las teorías imprecisas de las épocas de la antigüedad, se llegaron a construir grandes obras que demuestran la habilidad práctica para utilizar principios básicos de hidrología. Se construyó, por ejemplo, por el año 4000 A. C., una presa sobre el río Nilo con el objeto de utilizar tierras de las llanuras de inundación para el cultivo. Así mismo, los pueblos de la Mesopotamia construyeron muros a lo largo de los ríos para protegerse de las inundaciones. Los acueductos griegos y romanos, así como los sistemas de control para irrigación en China, también constituyen ejemplos de obras que involucran la aplicación de conceptos hidrológicos.

Hacia fines del siglo V, se generó en Europa una tendencia científica, basada más en la observación que en el razonamiento filosófico. Leonardo da Vinci y Bernard Palisi llegaron independientemente a una descripción precisa del ciclo hidrológico basando sus teorías en observaciones de fenómenos naturales como la lluvia, la evaporación, la infiltración y el escurrimiento.

La hidrología como ciencia moderna se origina con los estudios pioneros de Perrault, Mariotte y Halley en el siglo XVII. Perrault con datos de precipitación y escurrimiento de la cuenca de drenaje del Río Sena demostró que los volúmenes de lluvia eran suficientes para mantener el flujo en el río. También logró medir la evaporación y la capilaridad de los suelos. Mariotte midió la velocidad del flujo en el Río Sena, la cual fue después transformada a caudal introduciendo mediciones de la sección transversal del río. El astrónomo inglés Halley midió la taza de evaporación del mar Mediterráneo y concluyó que el volumen evaporado era suficiente para sustentar el flujo en todos los ríos tributarios a dicho mar. Estas observaciones, aunque un tanto rudimentarias debido a la falta de instrumentos de medición precisos, permitieron conclusiones confiables acerca de los fenómenos hidrológicos.

En el siglo XVIII se lograron notables avances en la teoría Hidráulica e instrumentación. El Piezómetro, el Tubo Pitot, el teorema de Bernoulli y la formula de Darcy son tan solo algunos ejemplos.

Durante el siglo XIX la hidrología instrumental floreció. Avances significativos se lograron en la hidrología del agua subterránea y en la medición de caudales de agua superficial. Se desarrollaron la ecuación de flujo capilar de Hagen-Poiseuille, la ley del

flujo en medios porosos de Darcy y la fórmula de Dupuit-Thiem para pozos. Los inicios de la medición sistemática de corrientes también se atribuyen a este siglo.

Aunque las bases de hidrología moderna ya estaban establecidas en el siglo XIX, mucho del trabajo desarrollado era de naturaleza empírica. Los fundamentos de la hidrología física aun no estaban bien definidos o ampliamente reconocidos y las limitaciones de varias formulaciones eran evidentes. Por tal motivo, varias agencias de los gobiernos de diferentes países implementaron programas propios de investigación hidrológica. De 1930 a 1950 procedimientos racionales fueron remplazando formulaciones empíricas. El concepto de hidrograma unitario desarrollado por Sherman, la teoría de infiltración de Horton y el concepto de no equilibrio de Thies para hidráulica de pozos son algunos ejemplos sobresalientes del gran progreso logrado.

Desde 1950 a la fecha el planteamiento científico de los problemas hidrológicos ha reemplazado los métodos menos complicados del pasado. Los avances en el conocimiento científico han permitido un mejor entendimiento de los principios físicos de las relaciones hidrológicas y el desarrollo de herramientas poderosas de cálculo han hecho posible el desarrollo de modelos sofisticados de simulación. Extensas manipulaciones numéricas que en el pasado eran prácticamente imposibles de realizar, ahora se llevan a cabo en cuestión de milésimas de segundos en poderosas computadoras digitales.

2.1 EL AGUA Y SU UTILIZACIÓN.

Es de conocimiento general que el agua es un compuesto vital, así como el más abundante sobre la tierra, pero realmente desconocemos hasta qué punto es importante este líquido.

Sin duda influye el saber que tan abundante es, para que descuidemos por esto su valor, al referirnos al agua como un elemento vital, nos basamos en que realmente no existiría la vida en la tierra sin agua, ya que cualquier ser viviente en su constitución tiene un considerable porcentaje de agua para poder seguir realizando sus funciones, y citaremos los siguientes ejemplos; los seres humanos necesitan un 97% de agua para mantener la vida en estado embrionario y de 58% a 67% ya siendo adulto, en los vegetales es del 75% al 95% de su peso total, como en el caso del tomate que contiene 95% de agua, y en los animales varía de 60% a 70% de su peso corporal.

La falta de agua en el humano provoca en pocos días la muerte, al perder el 12% del agua contenida en el cuerpo puede sobrevenir la muerte, ya que si no se bebe agua en 4 días, la deshidratación provoca además de una sed intensa, sequedad en la piel y las mucosas, e insuficiencia cardiaca y renal, entre otros trastornos y lo coloca en estado crítico que lo lleva al coma y muerte que sobreviene a los 10 días aproximadamente.

En la antigüedad como en otros aspectos, se tuvieron conceptos erróneos respecto al agua y podemos citar a Tales de Mileto, quien centró la atención en el agua como posible inicio del Universo; Homero que creía en la existencia de un gran almacén subterráneo que abastecía los ríos, mares, manantiales y pozos; los griegos y romanos que aceptaban que el agua de los océanos se movía subterráneamente hasta la base de las

montañas y de ahí ascendía como vapor a través de conductos hasta la cumbre de las montañas, donde se condensaba y alimentaba a los manantiales que forman las corrientes.

Sin embargo la realidad es que el agua que bebemos no es tan abundante como parece, y si al principio de las civilizaciones el manantial o río que servía como fuente de abastecimiento de "agua dulce" a la población era suficiente, ahora con la explosión demográfica mundial se han visto disminuidas y contaminadas estas fuentes, por lo que día a día es un problema más grave el abastecimiento del vital líquido.

Para tener un conocimiento real de este recurso, es necesario conocer el inventario del agua en la tierra y el porcentaje que representa la del consumo humano del total:

LOCALIZACIÓN	Área (10^6 Km2)	Volumen (10^6 Km3)	Porcentaje del agua total	Porcentaje de agua dulce
Océanos	361.3	1338.00	96.5	
Aguas subterráneas **Dulce** **Salada**	134.8 134.8	10.53 12.87	0.76 0.93	30.1
Humedad del suelo	82.0	0.0165	0.0012	0.05
Hielo polar	16.0	24.0235	1.7	68.6
Hielo no polar y nieve	0.3	0.3406	0.025	1.0
Lagos **Dulces** **Salinos**	1.2 0.8	0.091 0.0854	0.007 0.006	0.26
Pantanos	2.7	0.01147	0.0008	0.03
Ríos	148.8	0.00212	0.0002	0.006
Agua biológica	510.0	0.00112	0.0001	0.003
Agua atmosférica	510.0	0.0129	0.001	0.04
Agua total	510	1385.98461	100.00	
Agua dulce	148.8	35.02921	2.5	100.00

Tabla 2. Porcentajes de agua.

De lo anterior se puede decir que el agua potable sólo es un porcentaje muy reducido del total, y que la idea errónea de las comunidades y sobre todo de las grandes ciudades de que el agua es inagotable y un bien de consumo disponible, ha provocado sobre todo un mal uso del recurso.

2.2 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es un proceso continuo de movimiento de agua de los océanos a la atmósfera, a la tierra y nuevamente al mar. Dentro de este proceso existen varios subciclos. La evaporación de cuerpos de agua continentales y la consecuente precipitación sobre el suelo antes de regresar al mar es un ejemplo de esto.

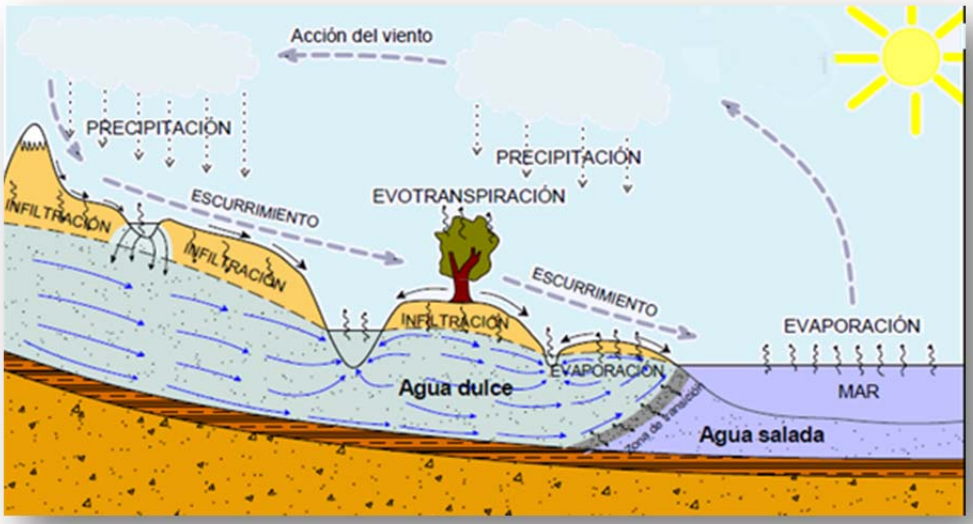


Fig. 2. Ciclo hidrológico.

La fuerza generadora del movimiento global de masas de agua es el sol que produce la energía necesaria para la evaporación. Durante este proceso varios cambios se producen la disponibilidad y localización del agua. La calidad del agua también se ve afectada por este proceso ya que, por ejemplo, al evaporarse del mar se convierte de agua salada en dulce.

El ciclo completo del agua es de naturaleza global y se requieren estudios en planos regionales, nacionales, internacionales e incluso continentales. El agua que fluye hacia una región no puede estar disponible en cantidad y calidad al mismo tiempo en otra región del mundo. Nace [1967] atinadamente señala que la disposición de recursos hidráulicos constituye un problema de naturaleza global con raíces locales.

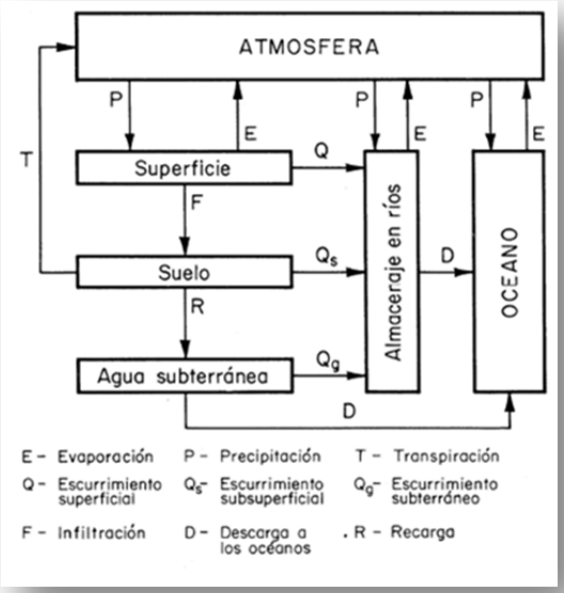


Fig. 3. Ciclo completo del agua.

CAPÍTULO 3

ESCENARIOS DE CÁLCULO Y ENFOQUE METODOLÓGICO

ÍNDICE

Introducción **27**
Clasificación **27**

3. ESCENARIOS DE CÁLCULO Y ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1. INTRODUCCIÓN

El primer paso para la definición de unas guías metodológicas es analizar los distintos escenarios de cálculo que se pueden presentar en un tramo de río, así como el enfoque metodológico a seguir en cada uno de ellos. Las posibilidades consideradas son las siguientes:

a) Tramo aforado: El tramo analizado tiene estación de aforos con datos de caudales máximos.
b) Tramo cuasi-aforado: En el tramo analizado no existe una estación de aforos pero si las hay en sus proximidades
c) Tramo no aforado: No hay estación de aforos ni en el tramo analizado ni en sus proximidades.

3.2. CLASIFICACIÓN

3.2.1. TRAMOS AFORADOS

En aquellos tramos donde existe una estación de aforos que dispone de una serie suficientemente larga de caudales máximos instantáneos, la metodología que se propone para determinar el caudal consistirá en obtener ese valor a partir de los parámetros estadísticos y coeficientes de variación deducidos de la serie de registros disponibles.

En primer lugar se deberá analizar si los caudales se encuentran afectados por obras hidráulicas o actuaciones de otro tipo en la cuenca que provoquen una alteración del régimen natural de crecidas, en cuyo caso deberá procederse a su restitución.

3.2.2 TRAMOS CUASI-AFORADOS

En tramos del río cuasi-aforados, definiendo como tales, aquellos en los cuales se dispone de una o más estaciones de aforos ubicadas en puntos cercanos al de estudio, pueden aplicarse las siguientes metodologías:

a) Obtención de una serie de caudales máximos a partir de los valores medidos en la estación de aforos, empleando para ello fórmulas empíricas que relacionan los caudales máximos con el área de la cuenca. Se recomienda su utilización sólo cuando existan pequeñas diferencias de área en la cuenca, ya que suponen una excesiva simplificación del fenómeno de la crecida.
b) Obtención de la serie o de la ley de frecuencia de los caudales máximos mediante la aplicación de métodos hidrometeorológicos. Estos métodos simulan el proceso precipitación-escorrentía mediante modelos cuyos parámetros se obtienen previamente, regionalizando los valores de los parámetros estimados en las cuencas aforadas del entorno.

3.2.3. TRAMOS NO AFORADOS

Este escenario es el que interviene en nuestro proyecto aunque como ya se mencionó el escenario de tramos cuasi-aforados también entraría ya que los datos de las estaciones de aforo en estos conllevarían un error significativo.

Si el tramo de río objeto de estudio no posee estación de aforos en sus proximidades y se trata de una cuenca pequeña o mediana, los caudales se obtienen a partir de metodologías donde la ley de frecuencia de caudales máximos se obtiene a partir de datos de precipitaciones máximas y de las características de la cuenca.

Estos métodos son más adecuados para cuencas pequeñas y medianas que para cuencas muy extensas. Sin embargo, es habitual que es estas últimas existan estaciones de aforo en las proximidades del punto de estudio y consecuentemente la metodología a emplear sería la misma que la de los ´´los tramos cuasi-aforados``. Si no existen estaciones de medida podrían aplicarse también los métodos hidrometeorológicos, pero con una mayor incertidumbre dada la dificultad que supone el establecimiento de las hipótesis de lluvia de cálculo sobre la cuenta.

CAPÍTULO 4

LA CUENCA HIDROLÓGICA

ÍNDICE

Cuenca hidrológica **30**
Características fisiográficas **31**
Construcción red curvas isócronas **32**
Características físicas **34**
Suelo, cobertura vegetal y condición hidrológica **45**

4. LA CUENCA HIDROLÓGICA

En este apartado comenzamos a definir todos los términos y cálculos que van a ser necesarios para la obtención final de nuestro caudal.

El análisis de los fenómenos hidrológicos en general y de los componentes del ciclo hidrológico en particular, queda facilitado de forma considerable con la adopción de una unidad geográfica limitada que tenga algunas características comunes.

La cuenca hidrológica se define como el área que contribuye al escurrimiento directo y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios.

Una cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o en materias sólidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura.

La siguiente imagen pone de relieve el concepto de cuenca: una gota de agua cae sobre una región particular C (Figura 4) se pone en movimiento por la fuerza de la gravedad, y si no queda retenida ni se evapora por el camino, llegará hasta un río, lago o mar. Si, por el camino que sea, la gota de agua va de C hasta B, la desembocadura del río A, se dice entonces que C pertenece a la cuenca de A. Así definido, resulta evidente que el límite de una cuenca es el lugar geométrico de los puntos más elevados.

El trazado del límite de una cuenca se hace empezando por la desembocadura y siguiendo los puntos más elevados hasta cerrar completamente el circuito. De la misma forma pueden trazarse las subcuencas de los tributarios principales cuyas características, comparadas con las de la cuenca principal nos ofrecen una idea de la homogeneidad o heterogeneidad de los distintos fenómenos hidrológicos.

Habida cuenta de la capa freática (Figura 5), es posible que el límite de una cuenca no sea la línea de cresta que separe dos vertientes, sino más bien aquella que queda definida por las elevaciones más altas de la capa. Sin embargo, dado que dicho límite es difícil de detectar, se suele considerar como cuenca el que está determinado por el drenaje superficial.

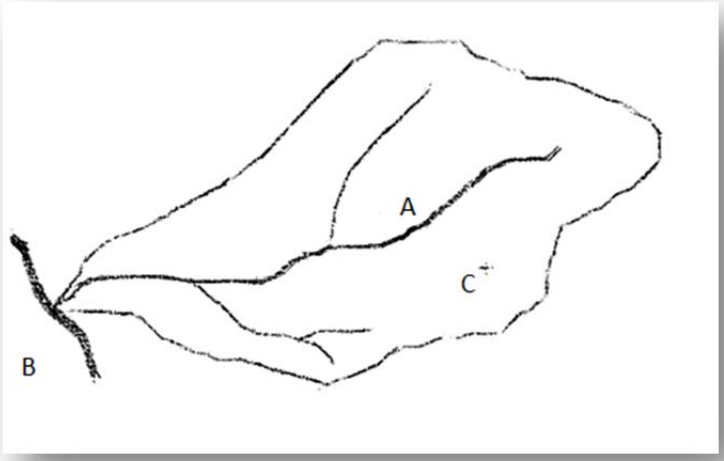


Fig. 4. Representación de una cuenca hidrográfica.

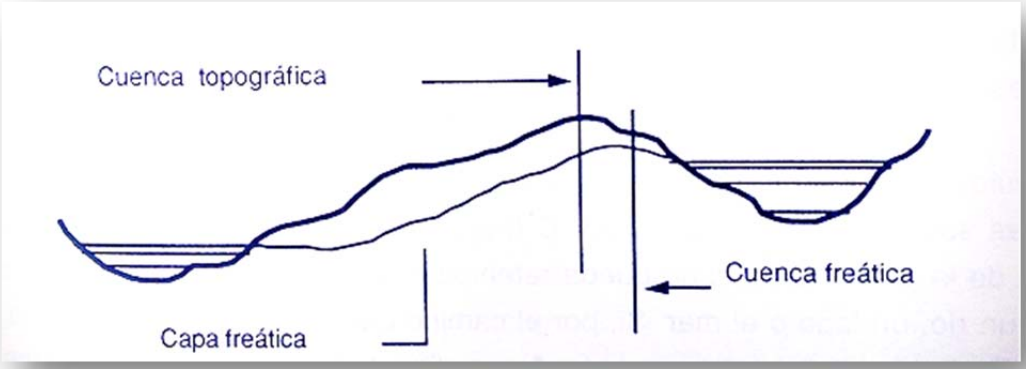


Fig. 5. Límites de una cuenca.

4.1 CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS

Los factores que determinan el flujo anual en la desembocadura de una cuenca son, en primer lugar, las condiciones climáticas de la región, y luego, el uso del suelo. No obstante, dos cuencas vecinas sometidas a las mismas condiciones climáticas pueden tener regímenes de flujo totalmente distintos.

Esta diferencia se debe principalmente a las diversas características físicas de ambas cuencas. Así, la pendiente del terreno y de los ríos tiene un efecto importante sobre el tiempo de respuesta de la cuenca, la forma influencia la fusión de la nieve o la cubierta vegetal que controla en parte la evapotranspiración.

Resulta evidente que el tipo de suelo y el espesor de la capa permeable ejercen un efecto sobre el régimen de flujo, pero dado que el suelo desempeña un papel en la formación de algunas características de la cuenca (la densidad del drenaje, por ejemplo), estas reflejan indirectamente su influencia.

Cuando una cuenca entera contribuye al flujo, se puede considerar que la fisiografía controla casi totalmente la respuesta de la cuenca a las precipitaciones. Pese a que, para una cuenca grande, una sola parte suele contribuir al flujo, la fisiografía juega un papel importante.

La transpiración de los datos hidrométricos de una cuenca a otra no puede llevarse a cabo sin el conocimiento de la influencia que ejercen algunos factores físicos sobre el flujo.

Estos factores pueden explicar también la diferencia entre las cantidades de sedimentos producidos por dos cuencas sometidas a la misma utilización.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE CURVAS ISOCRONAS

La curva isócrona es el lugar geométrico de los puntos tales que el tiempo de recorrido de una gota de agua desde uno de estos puntos hasta la desembocadura es el mismo. Es necesario construir una red de isócronas de una cuenca para entender la importancia relativa de cada una de sus subcuencas en el hidrograma de un aguacero cualquiera. La isócrona más alejada de la desembocadura representa el tiempo de respuesta de una cuenca, es decir el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, toda la superficie de la cuenca contribuya al flujo en la desembocadura.

El trazado de una red de isócronas en una cuenca es una operación larga y, por lo general, poco precisa cuando son escasas las medidas en el terreno. He aquí un método que da resultados bastante satisfactorios: se empieza a dividir la red hidrográfica en segmentos de longitud constante a partir de la desembocadura hasta la parte aguas arriba de los tributarios más pequeños. Tras ser numerados, cado uno de los puntos está caracterizado por tres parámetros: distancia hasta la desembocadura, elevación relativa y tiempo de recorrido del agua. Este último parámetro es el único que aparece en el mapa de la cuenca.

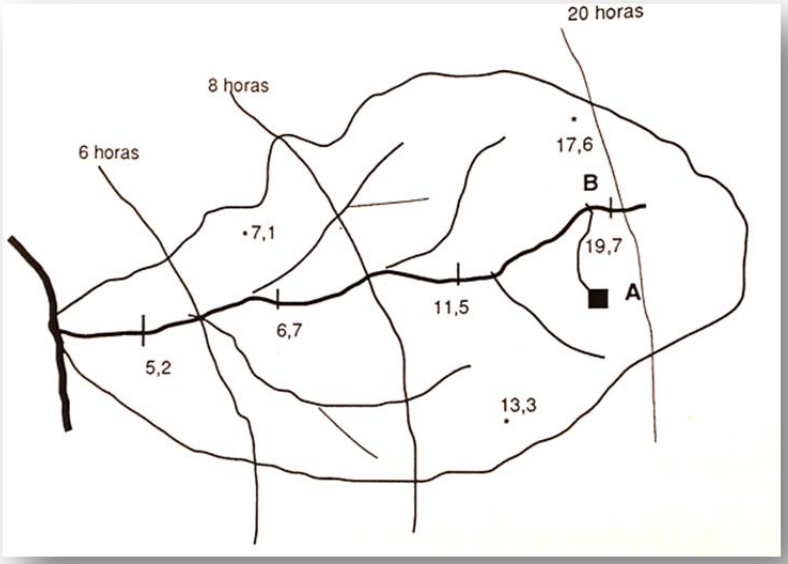


Fig. 6. Método de puntos aleatorios para trazar la red de isócronas.

El tiempo de recorrido desde i hasta la desembocadura es:

$$t_i = \frac{d_i}{v_m}$$

Donde:

d_i: Distancia medida según el trayecto de los ríos.
v_m : Velocidad media del agua que se puede estimar con la fórmula siguiente, sugerida por el Instituto Bávaro de Hidrología:

$$v_m = 20\ (sen\ \rho_i)^{3/5}$$

Donde:

$$sen\ \rho_i \cong tg\rho_i = \Delta Hi/d_i$$

Hi: Es el desnivel entre el punto i y la desembocadura.

La segunda operación consiste en trazar, de forma aleatoria, cierto número de puntos diseminados por la cuenca y, a partir de cada uno, se dibuja el recorrido probable del agua (es decir, la línea de pendiente máxima) hasta el encuentro con el río o uno de sus tributarios. Sea el trayecto AB de la Figura 6. Ya que el tiempo de recorrido del punto B es de unas 19 horas (por interpolación), el tiempo del punto A será:

$$t_A = 19 + t_{AB}$$

Y el tiempo t_{AB} puede calcularse utilizando las fórmulas para t_i y v_m.
Una vez caracterizados todos los puntos por su tiempo de recorrido, se puede trazar la red de isócronas por interpolación.

4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características físicas que componen la cuenca de captación son:

Área
Pendiente
Elevación media
Red de drenaje
Pendiente del cauce
Tiempo de recorrido
Área-elevación
Densidad hidrográfica
Centro de gravedad
Longitud de un río
Cociente de sinuosidad topográfica
Cociente de sinuosidad hidráulica
Perfil longitudinal del río principal
Potencia característica de un río

4.3.1 ÁREA

Área de la proyección horizontal de la cuenca de drenaje**.**

4.3.2 PENDIENTE

Valor representativo del cambio de elevación en el espacio de una cuenca.

Métodos de cálculo

a) *Critério de Alvord*

$$S_c = \frac{DL}{A}$$

Donde:

Sc = Pendiente de la cuenca.
D = Desnivel constante entre curvas de nivel (m).
L = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (m).
A = Área de la cuenca (m2).

b) *Criterio de Horton*

Con base en una malla sobrepuesta en la cuenca y orientada según la dirección del cauce principal, como se muestra en la Figura 7, y se puede calcular la pendiente media de la cuenca como se muestra a continuación.

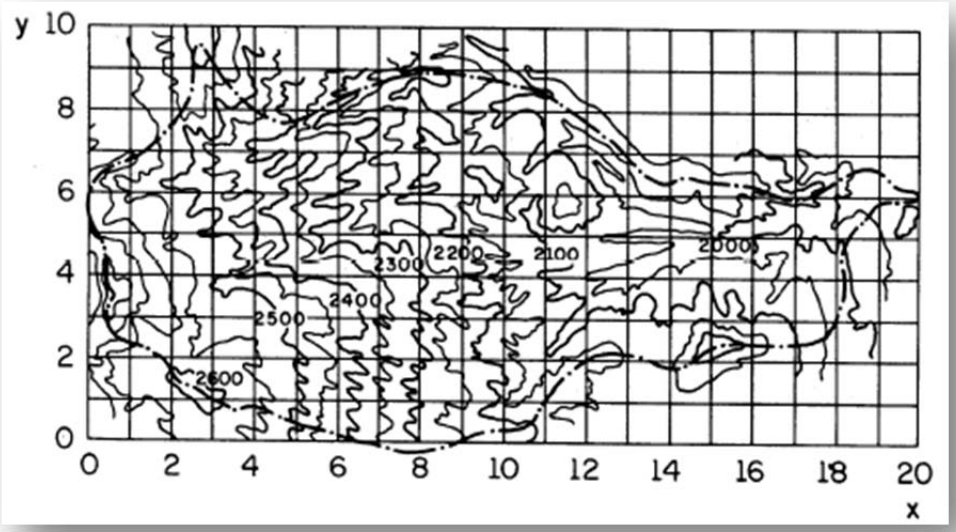


Fig. 7. Cuenca mallada.

Las pendientes en la direcciones x, y se calculan como:

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x}$$

$$S_y = \frac{N_y D}{L_y}$$

Donde:

S_x= Pendiente de la cuenca en la dirección x.
S_y= Pendiente de la cuenca en la dirección y.
D= Desnivel constante entre curvas de nivel (m).
L_x= Longitud total de las líneas de la malla en la dirección x, comprendidas dentro de la cuenca (m).
L_y= Longitud total de las líneas de la mallas en la dirección y, comprendidas dentro de la cuenca (m).
N_x = Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x con las curvas de nivel.
N_y= Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y con las curvas de nivel.

Finalmente la pendiente de la cuenca, *Sc* se calcula como:

$$S_c = \frac{NDsec\Theta}{L}$$

Donde:

Sc = Pendiente de la cuenca.
L = Lx + Ly
N = Nx + Ny
θ^2 = Ángulo entre las líneas de la malla y las curvas de nivel.

c) Criterio de Nash

Con base, también, en una malla sobrepuesta en el plano topográfico de la cuenca, de manera que se obtengan aproximadamente 100 intersecciones, se procede como sigue:

1. Se calcula la pendiente en los puntos representados por las intersecciones de la malla.

$$S_i = \frac{D}{Li}$$

Donde:

Si = Pendiente en el punto i.
Li = Distancia mínima entre las curvas de nivel medida, sobre el punto de intersección (m).
D = Desnivel entre curvas de nivel (m).

2.-Se calcula la pendiente como:

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} Si}{n}$$

Donde:

Sc = pendiente de la cuenca.
n = número de intersecciones de la malla dentro de la cuenca.

4.3.3 ELEVACIÓN MEDIA

Altura media de la cuenca sobre el nivel del mar o cualquier otra referencia.

Método de cálculo

a) Se construye una malla sobre el mapa topográfico de la cuenca.
b) Se determina la elevación de cada punto de intersección (nodo) de la malla que esté dentro de la cuenca.
c) Se obtiene el promedio aritmético de todas las elevaciones, de acuerdo con la siguiente expresión.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ei}{n}$$

Donde:

Em = elevación media (m o metros sobre el nivel del mar, “ms.n.m.”).
Ei = elevación del nodo i (m.s.n.m.).
n = número de nodos.

4.3.4 RED DE DRENAJE

Arreglo geométrico de los cauces de las corrientes naturales de la cuenca que se define con base en:

- Tipo de corrientes.
- Orden de las corrientes.
- Longitud de tributarios.
- Densidad de corriente.
- Densidad de drenaje.

- Tipo de Corrientes.

De acuerdo al tiempo que dura el escurrimiento en el cauce, las corrientes se clasifican en:

a) Efímera.-Se presenta cuando llueve e inmediatamente después.
b) Intermitente.- Ocurre la mayor parte del tiempo, principalmente en época de lluvias.
c) Perenne.- Ocurre todo el tiempo, su caudal es alimentado por agua subterránea.

- Orden de las corrientes.

Según el grado de bifurcación de los cauces dentro de una cuenca se tiene:

Grado 1 – corrientes sin tributarios.
Grado 2 – corrientes con tributarios de grado 1.
Grado 3 – corrientes con 2 o más tributarios de grado 2.
Etc.

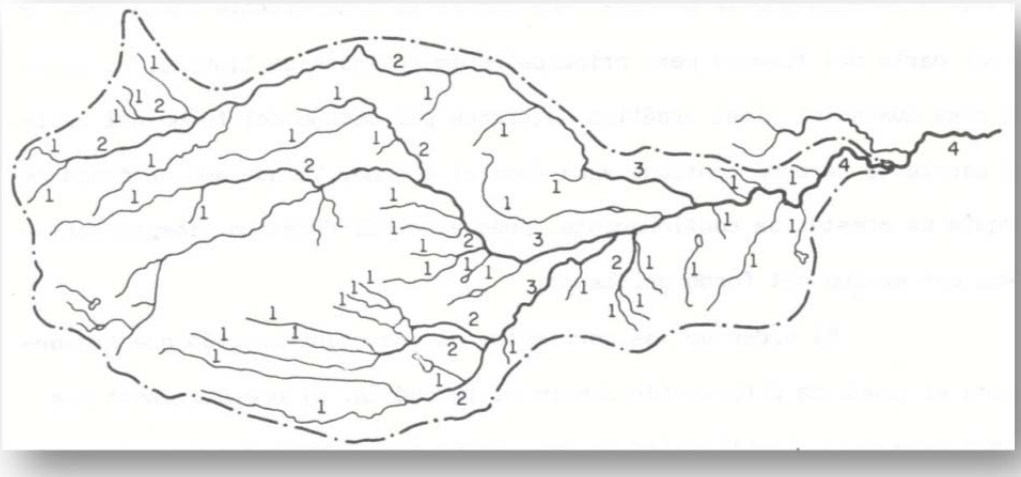


Fig. 8. Red de drenaje.

- Longitud de los tributarios

Proporciona una idea de la pendiente de la cuenca y el grado de drenaje, se mide a lo largo del valle sin tomar en cuenta los meandros.

- Densidad de corriente

Relación entre el número de corrientes y el área drenada.

$$D_s = \frac{N_s}{A}$$

Donde:

A = área total de la cuenca, en km2.
Ns = número de corrientes perennes e intermitentes.
Ds = densidad de corriente.

- Densidad de drenaje

Relación entre la longitud total de las corrientes perennes e intermitentes y el área de la cuenca.

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

Donde:

D_d = densidad de drenaje.
L = suma de las longitudes de corrientes perennes e intermitentes (m).
A = área de la cuenca (km2).

4.3.5 PENDIENTE DEL CAUCE

Existen diversos criterios para determinar la pendiente de un cauce, de entre ellos el más simple es el siguiente:

Desnivel entre los extremos del cauce dividido entre la longitud de éste.

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

Donde:

S = pendiente del tramo del cauce.
H = desnivel entre los extremos del tramo del cauce (m).
L = longitud del cauce (m).

Otro criterio es el de la "Pendiente compensada", el cual consiste en obtener la pendiente de la línea que inicia en el extremo final del cauce (aguas abajo) y que divide el área bajo la curva en 2 partes iguales, siendo la pendiente de dicha línea la elevación de la línea compensada entre la distancia, como se aprecia en la Figura 9.

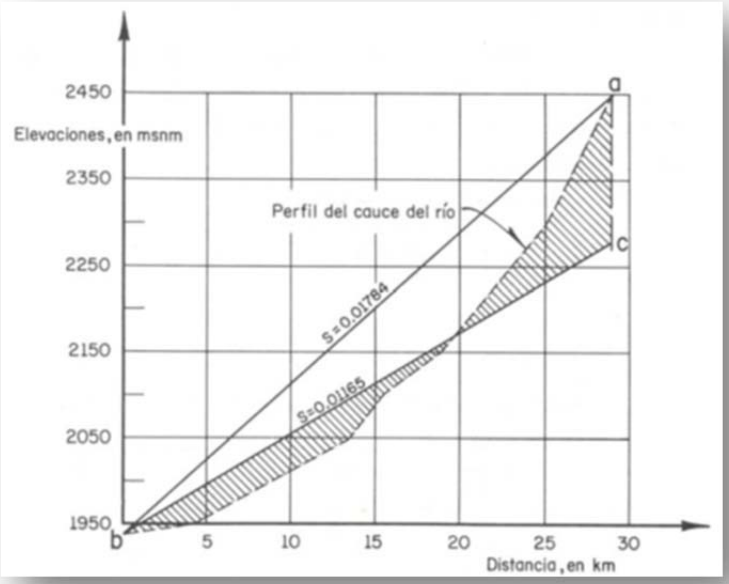


Fig. 9. Pendiente del Río Oro (Springal, 1970)

El criterio más aceptado es la ecuación de "Taylor y Schwarz", en el cual se propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga una longitud y tiempo de recorrido equivalentes a la del cauce. Para esto se divide el perfil del cauce en tramos iguales como se muestra en la Figura 10.

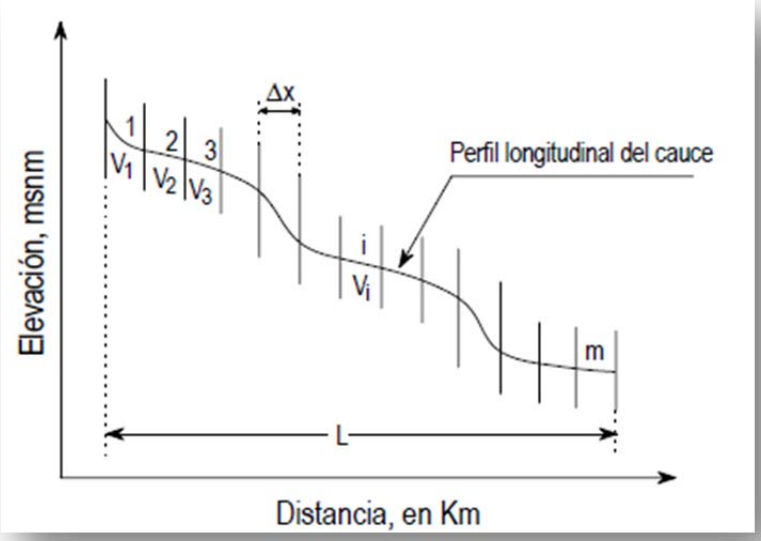


Fig. 10. Perfil longitudinal del cauce.

La velocidad de recorrido del tramo *i*, se calcula con la fórmula Chezy, es decir:

$$v_i = k_i\sqrt{S_i}$$

Donde:

Ki = coeficiente que depende de la rugosidad y la geometría del cauce.
Si =pendiente del tramo i.

Además. La velocidad v_i se define como:

$$v_i = \frac{\Delta x_i}{t_i}$$

Donde:

Δx = longitud del tramo i (m).
ti = tiempo de recorrido en ese tramo (seg).

Combinando estas dos expresiones, se tiene que:

$$t_i = \frac{\Delta x_i}{k_i\sqrt{S_i}}$$

Si se considera la longitud total del cauce (*L*), entonces la velocidad media (*V*) será:

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

T = tiempo total de recorrido en el cauce.

El cual puede expresarse como:

$$T = \sum_{i=1}^{m} ti = \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta x_i}{k_i\sqrt{S_i}}$$

Y la longitud *L*, como:

$$L = \sum_{i=1}^{m} \Delta x_i$$

Combinando estas ecuaciones, se tiene lo siguiente:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^{m} \Delta x_i}{\sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta x_i}{k_i\sqrt{S_i}}}\right]^2$$

Al considerar Δ*x* y *Ki* constantes, esta expresión se transforma en la ecuación de Taylor y Schwarz:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{S_{m1}}}} \right]^2$$

Donde:

S = pendiente del cauce.
Si = pendiente del tramo i del cauce.
m = número de tramos en que se subdivide el cauce.

4.3.6 ÁREA – ELEVACIÓN

Es la relación que muestra la variación del área con respecto a la elevación. Se obtiene determinando el área que encierra cada curva de nivel y generalmente se utiliza para definir las características que tendrá el vaso de un embalse, es decir una presa y se acostumbra relacionar dichos valores con lo que sería la capacidad o volumen de agua a almacenar, siendo común representar los tres valores anteriores por medio de una gráfica que se denomina "Curva Elevaciones – Capacidades – Áreas" como la Figura 11 y que se usa para realizar el funcionamiento del vaso y el tránsito de avenidas por el vaso.

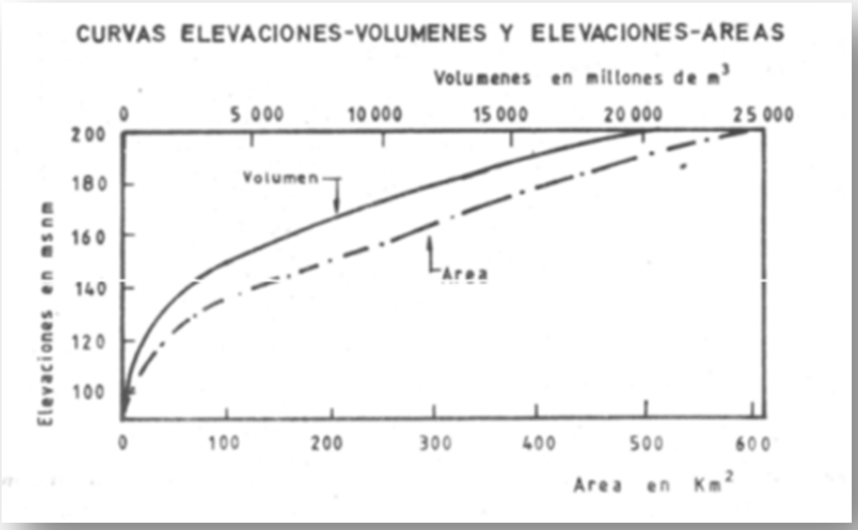


Fig. 11. Perfil longitudinal del cauce.

Para calcular la curva en la etapa de estudios preliminares o de planeación, se puede utilizar una carta topográfica escala 1:50000 y para la etapa de estudio de factibilidad y de detalle se deberá de realizar un levantamiento topográfico a mayor detalle.

Fig. 12. Carta topográfica.

Fig. 13. Imagen real cuenca.

4.3.7 DENSIDAD HIDROGRÁFICA

La densidad hidrográfica representa el número de canales de flujo por unidad de superficie:

$$F = \frac{\sum_1^U N_k}{A} \ (en\ km^{-2})$$

Donde:

N_k: Número de vectores de orden k.
A: Superficie de la cuenca en km^2.

Entre la densidad de drenaje y la densidad hidrográfica, existe una relación bastante estable, de forma:

$$F = aD^2$$

Donde ´´a`` es un coeficiente de ajuste.
De acuerdo con la anterior fórmula tenemos:

$$F = \frac{N_u(1 - {R_c}^u)}{A(1 - R_c)}$$

4.3.8 CENTRO DE GRAVEDAD

El centro de gravedad es un parámetro de particular importancia para el cálculo del hidrograma sintético. Su determinación puede hacerse analíticamente como para el cálculo del momento de inercia de una superficie.

4.3.9 LONGITUD DE UN RÍO

Es la distancia entre la desembocadura y el nacimiento. Hay que distinguir entre la longitud, L_V, del valle, la longitud, L_a, del eje del río, y la longitud directa, L_c, en línea recta entre las extremidades. En los tres casos, estas longitudes son las proyecciones de los valores reales sobre un plano horizontal. Para calcular las dimensiones reales hay que dividir estos valores por el coseno del ángulo que forma el eje del río con la horizontal.

4.3.10 COCIENTE DE SINUOSIDAD TOPOGRÁFICA

Es el cociente entre la longitud del valle y la del eje:

$$S_t = \frac{L_v}{L_a}$$

4.3.11 COCIENTE DE SINUOSIDAD HIDRÁULICA

Es el cociente entre la longitud directa y la del eje:

$$S_h = \frac{L_c}{L_a}$$

4.3.12 PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO PRINCIPAL

El perfil longitudinal es un gráfico que representa las distintas elevaciones del fondo del río desde el nacimiento hasta la desembocadura.

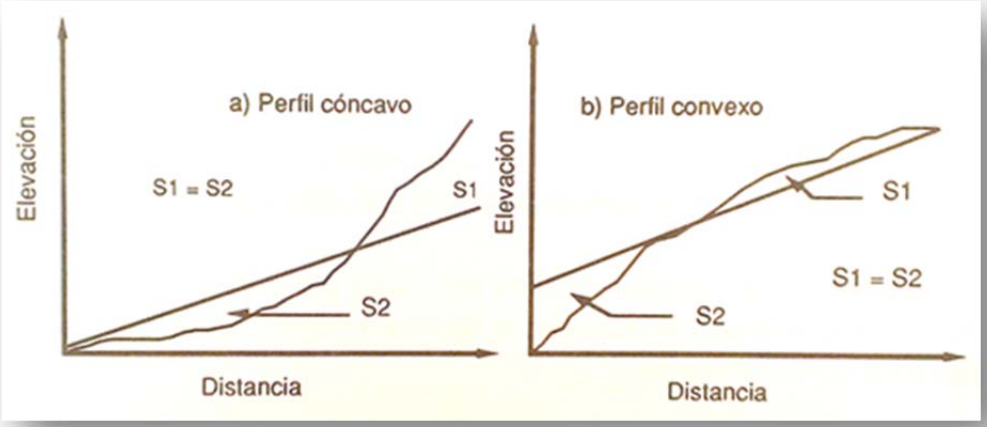


Fig. 14. Cálculo de la pendiente media de un río.

La forma del perfil varía entre linear (H = a – bL) o logarítmica (log H = log a – b log L). En estas ecuaciones H representa la altura a partir de la desembocadura, L la distancia y a y b son constantes.

Según Sribnyi se puede calcular analíticamente el perfil longitudinal, según el siguiente método.

Sea A el punto más alejado de la desembocadura B siguiendo la prolongación del río principal. Siendo h_p la elevación del punto A con relación a B. Y siendo D la superficie por encima del perfil longitudinal, y D_x la superficie parcial entre A y una distancia x.

$$D_x = \left(\frac{x}{I}\right)^{\zeta-1}$$

$$D = (Ih_p)/(1+\zeta)$$

Entonces:

$$\zeta = \frac{Ih_p}{D} - 1$$

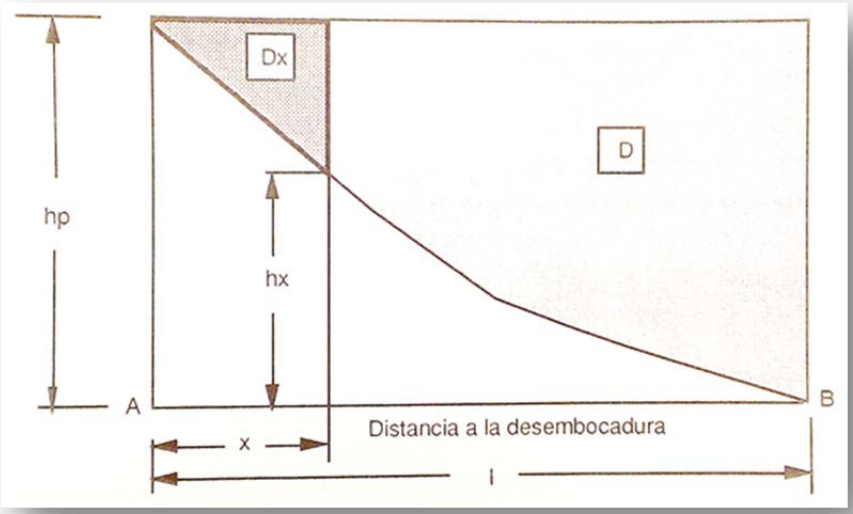


Fig. 15. Perfil longitudinal de un río.

De esta forma, se puede calcular la elevación h_x que corresponde a una distancia x del punto A. En efecto, si se conoce la elevación $h_{x-\Delta x}$ correspondiente a la distancia x-Δx, la elevación h_x es:

$$h_x = 2h_p - h_{x-\Delta x} - \frac{2(D_x - D_{x-\Delta x})}{D_x}$$

Según Hack, la elevación, H, de un punto del perfil longitudinal, puede expresarse por la fórmula:

$$H = K \ln L - C$$

Donde K es el producto de la longitud total del río principal por su pendiente en ese punto, C es un coeficiente y L la distancia a la desembocadura.

4.3.13 POTENCIA CARACTERÍSTICA DE UN RÍO

Con objeto de poder comparar rápidamente el potencial energético probable de los distintos ríos de una cuenca para establecer un primer orden de prioridad de desarrollo, se puede recurrir al concepto de potencia característica, curo significado es el siguiente.

Consideremos el perfil longitudinal de un río que tiene una longitud y un desnivel total H_t con un caudal Q_t en la desembocadura. Si se imagina una presa hipotética que tenga una altura H_t, resulta evidente que la potencia disponible al pie de presa será:

$$N_1 = K(H_1 Q_t + H_2 Q_2)$$

Pero, como $Q_2 > Q_t$, puesto que la superficie drenada es menor, $N_2 < N_1$

De la misma manera, se puede ver que si aumenta el número de presas virtuales, $N_1 > N_2 > N_3 > \cdots, > N_n$

Por lo general, cuando n tiende hacia ∞, la potencia N_n tiende hacia un valor constante P al que llamamos potencia característica, y que representa la potencia del río sin ninguna modificación de sus condiciones naturales.

Para su cálculo se procede de la forma siguiente:

Se calculan las potencias N_1, N_2, N_3… estimando los caudales en los distintos puntos por proporcionalidad con la superficie de sus cuencas respectivas. A continuación se llevan estas potencias sobre un gráfico en el que en abcisas figuran las distancias L/n, siendo n el número de embalses virtuales en cada caso. La intersección de la curva con el eje de ordenadas, nos define la potencia característica o la potencia natural del río.

4.4 USO DEL SUELO, COBERTURA VEGETAL Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA

Un aspecto importante en el estudio hidrológico de una cuenca de aportación es la capacidad que tiene de interceptar o infiltrar el agua de lluvia, que para el caso de la hidrología de superficie, sería la definición de la cantidad de lluvia en exceso, es decir la complementaria de la lluvia total y que es la que no se pierde y genera el escurrimiento tanto por la superficie del terreno, como su concentración por medio de cauces naturales (arroyos y ríos).

La determinación de la cantidad de agua de lluvia en exceso es función directa de las características fisiográficas de la cuenca, las cuales se vieron con anterioridad, y del uso del suelo, cobertura vegetal, textura y condición hidrológica de esta. Estos últimos factores son utilizados para definir lo que se conoce como coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento “C” o número de escurrimiento “N”, es utilizado para el cálculo del gasto que puede escurrir una cuenca hidrológica a partir de la intensidad de la lluvia o la altura de precipitación máxima en 24 horas.

Para el primer caso, es decir para el coeficiente de escurrimiento “C”, se puede determinar su valor para una cuenca con la ayuda de las tablas 3 o 4 propuestas por el propio método, o en su defecto las tablas 5 o 6, complementadas con la 7, propuestas por la Soil Conservation Service de los E. U. (USSCS o SCS):

Tipo de Área Drenada	Coeficiente de Escurrimiento	
	mínimo	máximo
Zonas Comerciales:		
Zona comercial	0.70	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas Residenciales:		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares, compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casa habitación	0.50	0.70
Zonas Industriales:		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios, Parques	0.10	0.25
Campos de Juego	0.20	0.35
Patios de Ferrocarril	0.20	0.40
Zonas Suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.70	0.95
Adoquinadas	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas:		
Suelos arenosos planos (pendientes 0.02 o menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 - 0.07	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

Tabla 3. Valores del coeficiente de escurrimiento del método racional

Factores de Clasificación		Valores de c' (*)
Topografía:	Terreno plano, con pendiente de 0.15%	0.30
	Terreno ondulado, con pendiente de 0.35%	0.20
	Terreno accidentado, con pendiente de 4.00%	0.10
Suelos:	Arcilloso- firme	0.10
	Arcilloso- arenoso	0.20
	Arcilloso- arenoso suelto	0.40
Cobertura:	Terrenos cultivados	0.10
	Bosques	0.20

Tabla 4. Para seleccionar el coeficiente de escurrimiento ´´C`` del método racional

(*) El coeficiente de escurrimiento C se obtiene restando a la unidad la suma de los c' para cada uno de los tres factores.

Topografía	Descripción de suelos o tipo de SCS	Cobertura vegetal	Coeficiente de escurrimiento C
Llana	Arcilloso firme impenetrable (D)	Cultivo Bosque	0.50 0.40
	Arcilla- arenoso firme (C y B)	Cultivo Bosque	0.40 0.30
	Arcilla- arenoso abierto (A)	Cultivo Bosque	0.20 0.10
Ondulada	Arcilloso firme impenetrable (D)	Cultivo Bosque	0.60 0.50
	Arcilla- arenoso firme (C y B)	Cultivo Bosque	0.50 0.40
	Arcilla- arenoso abierto (A)	Cultivo Bosque	0.30 0.20
Accidentada	Arcilla- arenoso abierto (A)	Cultivo Bosque	0.70 0.60
	Arcilla- arenoso firme (C y B)	Cultivo Bosque	0.60 0.50
	Arcilla- arenoso abierto (A)	Cultivo Bosque	0.40 0.30

Tabla 5. Coeficiente de escurrimiento de acuerdo a la topografía.

Tipos de Suelos U.S.S.C.S.	(P24h) 100 milímetros	Coeficiente de escurrimiento C para áreas en km2				
		≤0.1	0.1-1.0	10-10	10-100	>100
Tipo (D)	≤80	0.80	0.70	0.65	0.65	0.60
	81-150	0.90	0.85	0.80	0.80	0.80
	151-200	0.95	0.90	0.90	0.90	0.90
	>200	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90
Tipo (C)	≤80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45
	81-150	0.85	0.80	0.75	0.65	0.65
	151-200	0.85	0.85	0.80	0.70	0.70
	>200	0.90	0.90	0.80	0.75	0.75
Tipo (B)	≤80	0.55	0.55	0.45	0.35	0.20
	81-150	0.65	0.63	0.56	0.45	0.30
	151-200	0.75	0.70	0.65	0.55	0.40
	>200	0.80	0.75	0.70	0.65	0.50
Tipo (A)	≤80	0.35	0.28	0.20	0.20	0.15
	81-150	0.45	0.35	0.25	0.25	0.20
	151-200	0.55	0.45	0.40	0.35	0.30
	>200	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40

Tabla 6. Coeficiente C en función del tipo de suelo.

Grupo A:	(Bajo potencial de escurrimiento). Suelos que tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de arenas y gravas prosudas y bien graduadas. Estos suelos tienen altas velocidades de transmisión.
Grupo B:	Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos arenosos menos profundos que los del grupo A y con drenaje medio, conteniendo valores intermedios de texturas finas a gruesas.
Grupo C:	Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estrato que impiden el flujo del agua, son suelos con texturas finas. Esos suelos tienen bajas velocidades de transmisión.
Grupo D:	(Alto potencial de escurrimiento). Suelos que tienen muy bajas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente en suelos arcillosos con alto potencial de hinchamiento, suelos con estratos arcillosos cerca de su superficie o bien sobre un horizonte impermeable.

Tabla 7. Tipos de suelos según la SCS de los E.U.

En el caso del número de escurrimiento "N", se emplean las siguientes tablas:

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorno	>1	70	79	84	88
	Contorno	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorno	>1	63	74	82	85
	Contorno	<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	>1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorno	>1	64	7	83	85
	Contorno	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales		>1	68	79	86	89
		<1	39	61	74	80
	Contorno	>1	47	67	81	88
	Contorno	<1	6	35	70	79
Pradera permanente		<1	30	58	71	78
Bosques naturales						
Muy ralo			56	75	86	91
Ralo			46	68	78	84
Normal			36	60	70	77
Espeso			26	52	62	69
Muy espeso			15	44	54	61

Tabla 8. Número de escurrimiento N.

Tipo de Suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Tabla 9. Determinación del tipo de suelo.

Para tomar en cuenta las condiciones iniciales de humedad del suelo, se hace una corrección al número de escurrimiento obtenido de la tabla 6, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha de interés (*hp* 5), conforme al siguiente criterio:

a) Si *hp* 5 < 2.5 cm se hace la corrección A.
b) Si 2.5 < *hp* 5 < 5 cm no se hace corrección.
c) Si *hp* 5 > 5 cm se hace la corrección B.

N	N con corrección A	N con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Tabla 10. Corrección de valor ´´N``.

Cuando se tiene que en la zona de estudio se tiene diversos tipos de uso de suelo, cobertura vegetal y/o condición hidrológica, es necesario encontrar un valor promedio, ya sea de C o de N, lo cual se puede hacer al encontrar el valor por cada área homogénea y multiplicar por su valor específico de C o N, para luego sumar dichos productos y dividir la suma entre el área total, es decir definir un valor promedio pesado, como por ejemplo en la Figura 16 que se tienen cuatro zonas homogéneas con valores diferentes de "N" (o "C") y ocupan una determinada área "A" en la cuenca.

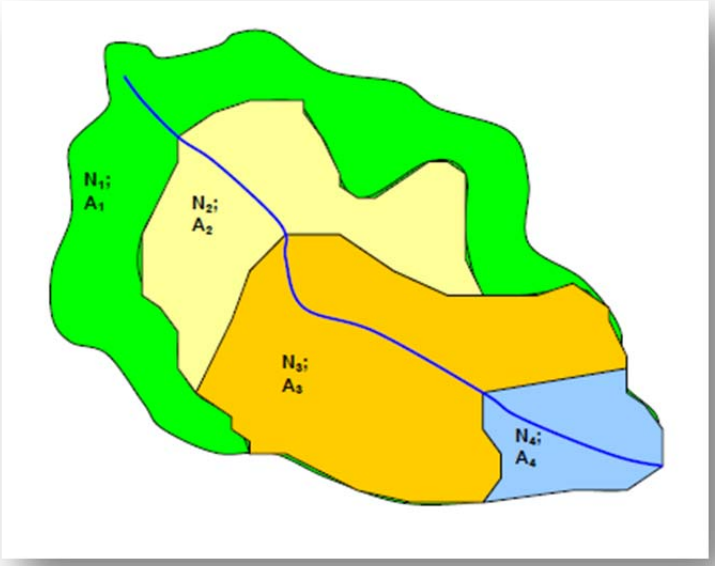


Fig. 16. Cuenca con diferentes tipos de suelo.

CAPÍTULO 5

LA PRECIPITACIÓN, DEFINICIÓN Y OBTENCIÓN

ÍNDICE

Nociones de meteorología **53**
Naturaleza de la precipitación **55**
Generación de precipitación **55**
Medición de precipitación **57**
Hietograma **58**
Precipitación media **59**
Método para la deducción de datos faltantes **59**

5. PRECIPITACIÓN

Fenómeno físico que consiste en la transferencia de volúmenes de agua, en sus diferentes formas (lluvia, nieve, granizo, etc.) de la atmósfera a la superficie terrestre.

5.1 NOCIONES DE METEOROLOGÍA

La meteorología estudia los fenómenos atmosféricos, tales como viento, precipitación, temperatura, presión atmosférica, etc. La parte de la meteorología que estudia los fenómenos atmosféricos relacionados con el agua se le conoce como hidrometeorología.

A la parte de la meteorología que estudia las relaciones del clima con los fenómenos atmosféricos se le conoce como climatología.

En lo siguiente se presentan algunas definiciones básicas de meteorología:

Presión Atmosférica. **-** peso de la columna de aire encima de un área unitaria

$$p = 1013{,}2\left[\frac{288 - 0{,}0065z}{288}\right]^{5{,}256}$$

Donde:

p = presión atmosférica en milibares (mb).
z = altura sobre el nivel del mar (m).

Presión de vapor.- peso de la columna de vapor encima de un área unitaria despreciando el efecto de otros gases. Para una temperatura y presión dadas, existe una cantidad máxima de vapor por unidad de volumen, que puede existir sin condensarse. Cuando una masa de aire contiene esa cantidad máxima, se dice que está saturada.

Punto de rocío.- temperatura a la que se presenta la condición de saturación "máxima" de vapor en un volumen unitario.

Presión de vapor de saturación.- presión de vapor de una masa de aire cuando está saturada.

$$e_d = e_w - 0{,}00066p(T_a - T_w)(1 + 0{,}00115T_w)$$

Donde:

e_d = presión de vapor correspondiente a un punto de rocío.
Ta = temperatura real del aire en ºC medida con un termómetro común (bulbo seco).
Tw temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo, en ºC.
e_w = presión de vapor correspondiente a T_w.
p = presión atmosférica.

Humedad relativa.- relación entre la presión de vapor real y la de saturación.

$$H_r = 100 * \frac{e_a}{e_d}$$

Donde:

Hr = humedad relativa, en %.
ea = presión de vapor real.
ed = presión de vapor de saturación.

Humedad absoluta.- masa de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire.

$$p_v = \frac{M_v}{V}$$

Donde:

ρv= humedad absoluta, densidad de vapor o concentración de vapor.
Mv = masa de vapor.
V = volumen de aire.

Humedad específica.- relación entre la masa de vapor y la de aire húmedo (aire+vapor).

$$H_s = q = \frac{M_v}{M_a + M_v} = \frac{\rho_v}{\rho_a + \rho_v} = \frac{\rho_v}{\rho}$$

Donde:

Hs = q = humedad específica.
M = masa de aire seco.
ρa = densidad de aire seco.
ρ = densidad de aire húmedo.

Agua precipitable.- masa total de vapor de agua existente en una columna de aire de área unitaria y altura z.

$$W = \int_0^z \rho_v \, dz$$

Asumiendo una variación hidrostática de la presión, es decir.

Dp=- ρg dz

Entonces:

$$W = \int_{po}^{p} \frac{\rho_v}{\rho g} \, dp$$

Y de la definición de humedad específica, ρv = ρg

$$W = \frac{1}{g}\int_{p}^{po} q\, dp$$

Donde:

W tiene unidades de $[M/L^2]$.

Si se desea que W tenga unidades de volumen/área, entonces:

$$W = 10\int_{p}^{po} q\, dp$$

Nubes.- se forman cuando el agua que se evapora de la superficie terrestre se eleva hasta que la presión y la temperatura sean tales que exista condensación, hasta que se alcancen temperaturas por debajo del punto de rocío.

Condensación.- ocurre cuando se unen varias de la pequeñas gotas (diámetro entre 5 y 100 μ) que se encuentran en las nubes. Sin embargo, para que esto suceda deben existir núcleos de condensación, que para condiciones de súper saturación comunes, son corpúsculos de naturaleza mineral u orgánica, presentes en la atmósfera y provenientes de la erosión de suelos, humos de combustiones, polen o cristales de sal marina.

5.2 NATURALEZA DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación es un fenómeno físico que consiste en la transferencia de volúmenes de agua, en sus diferentes formas (lluvia, nieve, granizo, etc.) de la atmósfera a la superficie terrestre. El proceso de generación de la precipitación involucra la humedad en la atmósfera la cual es influenciada por factores climáticos tales como el viento, la temperatura y la presión atmosférica. La humedad de la atmósfera es necesaria pero la precipitación no ocurre si no se tiene la suficiente condensación.

Debido a la condensación sobre núcleos, se forman gotas de tamaño entre100 y 500 μ, que debido al propio peso, se precipitan. En la caída, al chocar con otras gotas, van creciendo y pueden alcanzar diámetros entre 5 y 7 mm.

Las masas de aire continental por lo general contienen muy poca humedad, por lo que la mayoría de la precipitación proviene de corrientes de aire húmedo que se genera sobre los océanos.

5.3 GENERACIÓN DE PRECIPITACIÓN

El proceso más eficaz para producir un exceso de vapor de agua en el aire es el enfriamiento. El enfriamiento más rápido lo produce la elevación, la cual puede ocurrir por diversas causas. Según la causa se tienen los siguientes tipos de generación de precipitación:

a) Precipitaciones frontales:

Ocurre debido a frentes de masas de aire con diferente temperatura, como se muestra en la Figura 17. Un frente frío ocurre cuando una masa de aire desplaza otra de aire caliente (izquierda del corte BB' de la Figura 17). Si una masa de aire caliente avanza sobre una masa de aire frío (derecha del corte BB' de la Figura 17), entonces se produce un frente caliente.

Las masas frías representan verdaderos obstáculos para las calientes, por lo tanto, el aire caliente menos denso, sube y se enfría. Si hay suficiente humedad, se origina precipitaciones que dependen de la dirección del movimiento de las masas y su estado de equilibrio.

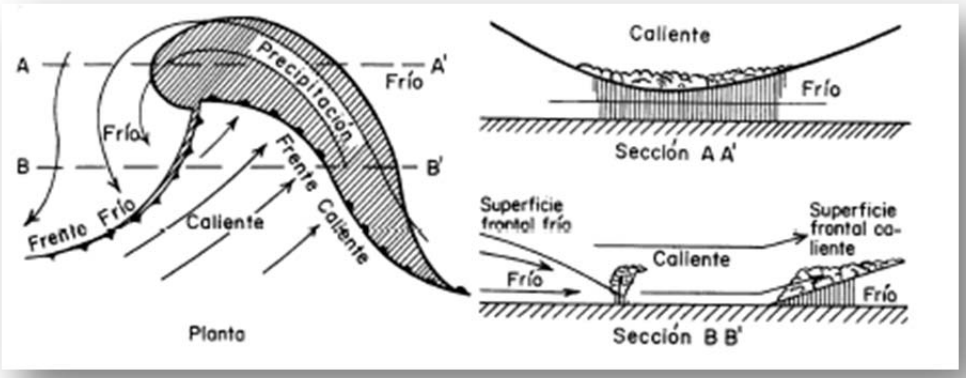


Fig. 17. Masas de aire.

b) Precipitaciones orográficas:

Si una masa de aire en movimiento encuentra un obstáculo orográfico, se eleva. Durante la elevación se enfría, alcanza el punto de rocío y comienza a eliminar el excedente de vapor de agua. Los productos de condensación, gotitas de agua o cristales de nieve, según sea la temperatura reinante crecerán progresivamente y debido a su peso, se precipitan a tierra.

c) Precipitaciones ciclonales:

Debido a que la superficie de la tierra se calienta en forma desigual, sobre las regiones más calientes el aire se dilata, disminuyendo su densidad y produciendo una reducción de la presión bajo el área en que se encuentra. Hacia esas regiones de baja presión o regiones ciclonales fluye el aire de los alrededores. Según el grado de humedad, se llegan a formar nubes altas estratificadas que producen precipitaciones moderadas.

d) Precipitaciones convectivas o de tormenta:

Para que pueda formarse una nube de tormenta y se desprenda de ella precipitaciones de consideración, es necesario que se eleve una masa de aire muy caliente y húmeda. Esto ocurre sólo cuando el gradiente térmico es superior a –1°C por cada 100 m, es decir, cuando el equilibrio de las masas de aire es inestable. Esta elevación suele ser violenta, con enfriamiento rápido y las precipitaciones son breves pero abundantes.

La serie se inicia con una granizada, continúa con una lluvia fuerte y prosigue con lluvia moderada para terminar, antes de finalizar la tormenta en lluvia fina.

5.4 MEDICIÓN DE PRECIPITACIÓN

Debido a que la precipitación ocurre en un espacio geográfico, resulta más conveniente expresarla en términos de una altura de lámina de agua, en mm. Sin embargo, es necesario suponer que se distribuye uniformemente sobre un área unitaria. Esto no es necesariamente cierto, ya que es común, aún en eventos de poca extensión, notar diferencias en la cantidad de agua precipitada. Pero para fines prácticos y con el objeto de facilitar el análisis, se asume el principio de uniformidad.

La mayoría de los aparatos que se utilizan para medir precipitación se basan en recipientes cilíndricos, expuestos a la intemperie y abiertos en la parte superior para captar el agua que se precipita, registrando su altura.

Pluviómetro. Cilindro con un embudo que alimenta una probeta graduada en el cual se miden alturas totales de lluvia. Un esquema simplificado de este aparato se muestra en la Figura 18.

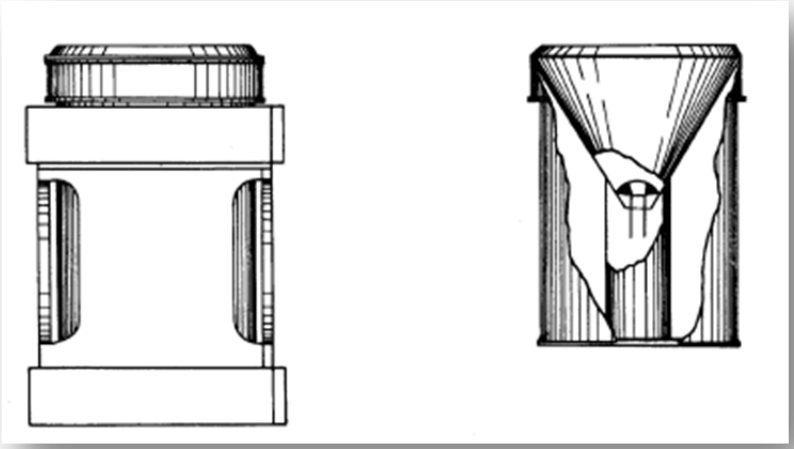


Fig. 18. Pluviómetro.

Pluviógrafo. Similar al pluviómetro con la adición de un sistema de registro continuo de alturas de lluvia, basado en flotadores que causan el desplazamiento de una aguja sobre un papel graduado, colocado sobre un cilindro giratorio, ligado a un reloj, como se muestra en la Figura 19.

Cuando la aguja llega al borde superior, automáticamente se regresa al borde inferior y continúa registrando.

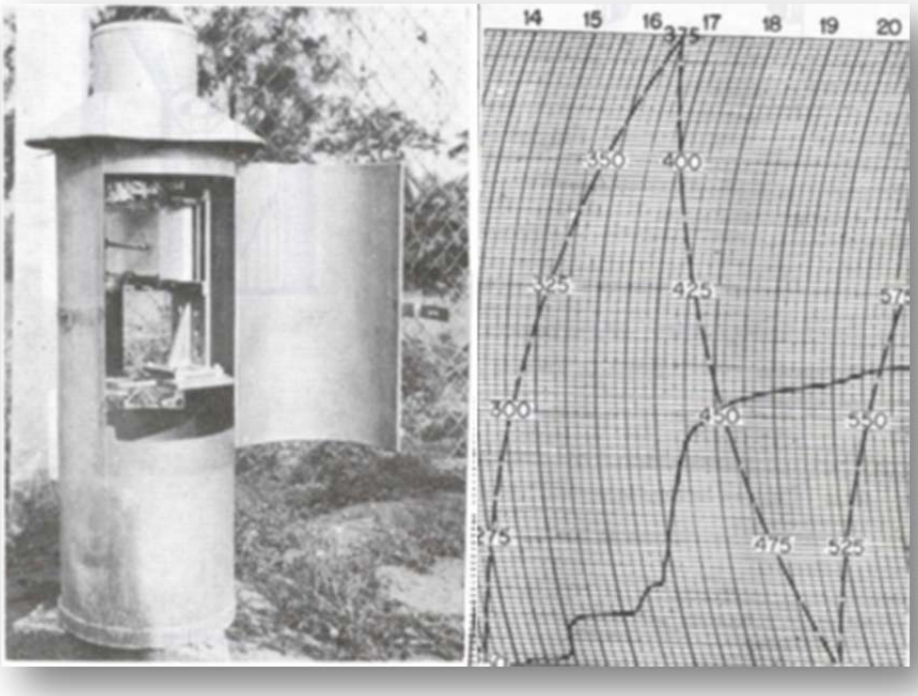


Fig. 19. Pluviógrafo.

Intensidad de lluvia

Los datos registrados con un pluviógrafo se pueden utilizar para determinar la intensidad de la lluvia, la cual se define como:

$$i = \frac{a}{t}$$

Donde:

i = intensidad de lluvia (mm/h).
a = altura de lluvia (mm).
t = tiempo de duración de la lluvia (h).

5.5 HIETOGRAMA

Los datos obtenidos con los pluviógrafos pueden ser utilizados para obtener el hietograma de las diversas tormentas registradas. El hietograma es un diagrama de barras que indica la variación de la altura o intensidad de lluvia con respecto al tiempo dividido en intervalos iguales de tiempo. El tamaño de este intervalo se selecciona arbitrariamente, pero debe ser lo suficientemente pequeño para captar las variaciones temporales de lluvia significantes.

En la actualidad los fluviógrafos incluyen equipo electrónico que les permiten almacenar e incluso enviar los datos, por medio de satélites o teléfono, a estaciones centrales. Por tal motivo los registros de papel se han ido remplazando por archivos digitales. También, los flotadores, que presentan problemas de atascamiento y mantenimiento, están siendo sustituidos por sensores electrónicos.

5.6 PRECIPITACIÓN MEDIA

Para determinar la precipitación media sobre una zona, es necesario contar con una buena cantidad de estaciones pluviométricas, distribuidas convenientemente. Si se tiene esto es posible determinar la precipitación media de acuerdo a varios criterios, entre los que se encuentran el "promedio aritmético", los "polígonos de Thiessen" y el de "Isoyetas" entre otros.

A. ***Promedio aritmético.-*** Se suma la altura de lluvia registrada en un cierto tiempo, en varias estaciones que se localicen en la zona de estudio, y se divide entre el número total de estaciones.

B. Método de Thiessen.- Consiste en trazar triángulos que ligan las estaciones más próximas entre sí y formar polígonos cuyas caras son las líneas bisectoras de los lados de los triángulos.

C. ***Método de Isoyetas.-*** Con los datos de precipitación se construye un plano de isoyetas, que son curvas que unen puntos de igual precipitación.

5.7 MÉTODOS PARA LA DEDUCCIÓN DE DATOS FALTANTES

Promedio aritmético.- Con los registros de 3 estaciones cercanas se calcula un promedio aritmético cuando dichos datos no difieren en más de un 10% de los registrados en la estación.

Promedio ponderado.- Cuando los datos de las 3 estaciones cercanas difieren en más de un 10% de los datos de la estación se utiliza la siguiente fórmula.

$$h_{px} = \frac{1}{3}\left[\frac{P_X}{P_A}h_{pA} + \frac{P_X}{P_B}h_{pB} + \frac{P_X}{P_C}h_{pC}\right]$$

Donde:

h_{pA}, h_{pB}, h_{pC}= altura de precipitación registrada en estaciones auxiliares.
h_{px}= altura de precipitación faltante.
PA, PB, PC = precipitación anual media en las estaciones auxiliares.
Px = Precipitación anual media en la estación en estudio

CAPÍTULO 6

PROCESO DE ESCURRIMIENTO

ÍNDICE

Proceso de escurrimiento **61**
Factores que influyen en el escurrimiento **61**
Componentes del escurrimiento **61**
Cálculo del escurrimiento **62**

6. ESCURRIMIENTO

El escurrimiento es el agua producto de la precipitación que fluye por las corrientes provenientes de diversas fuentes y que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser finalmente drenada hasta el final de la cuenca.

6.1 PROCESO DEL ESCURRIMIENTO

El agua de la precipitación llega primero a los objetos que están sobre la superficie del terreno, como son los árboles, casas, cultivos, pasto, rocas, etc. En estos lugares parte de la lluvia es interceptada, como se mencionó anteriormente, y parte llega al suelo, en donde se infiltra para llenar las depresiones topográficas y se va acumulando en el terreno hasta saturar el terreno y fluir superficialmente por las laderas hacia los cauces.

6.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESCURRIMIENTO

Todas las particularidades de un régimen de lluvia se reproducen en la circulación de las aguas, por lo que las corrientes son afectadas principalmente por los siguientes factores:

a) Precipitación
b) Características fisiográficas.
c) Uso del suelo y cobertura vegetal.
d) Condiciones hidrológicas antecedentes.

Los factores antes mencionados se han descrito a detalle con anterioridad.

6.3 COMPONENTES DEL ESCURRIMIENTO

De conformidad con lo anterior se podría definir tres zonas donde se presenta el escurrimiento, que son:

- Escurrimiento superficial, el cual está compuesto por el que escurre tanto por el terreno como por los arroyos y ríos.
- Escurrimiento sub-superficial, la cual se encuentra bajo la superficie del terreno, pero cerca de ella y que se encuentra en la zona de saturación del subsuelo.
- Escurrimiento subterráneo, es aquella agua que logra infiltrarse en el terreno hasta niveles inferiores al nivel freático o zona de saturación.

El flujo superficial se realiza en forma rápida, sobre todo comparado con el subterráneo, que es lento, sin embargo el superficial puede ser sólo un poco menos rápido que el superficial o tan lento como el subterráneo, dependiendo de las condiciones del suelo.

Por esta razón se ha clasificado al escurrimiento, en términos de su rapidez, en dos clases que son:

Escurrimiento directo.- Es aquel que se forma por los flujos de superficie y subsuperficial rápido, es decir aquel que tiene una respuesta rápida a la lluvia y que se considera como el resultado de la lluvia efectiva o en exceso.

Escurrimiento base.- Es el formado por el flujo subsuperficial lento y el subterráneo, es decir es el que no depende esencialmente de la presencia de la lluvia.

6.4 CÁLCULO DE LA ESCORRENTIA ANUAL

El balance hídrico se establece entre las cantidades de agua que entran y salen de un sistema definido en el espacio y en el tiempo. A nivel de tiempo puede introducirse la noción de año hidrológico. A nivel de espacio se trabaja a la escala de la cuenca de recepción. En una pequeña cuenca de captación, que soporte un balance hídrico prácticamente independiente, las importaciones y exportaciones a otros territorios se consideran nulas y las salidas subterráneas al mar, en cuencas que alimentan pequeñas centrales, podrán considerarse porcentualmente despreciables.

Una parte no despreciable del agua de lluvia no llega al suelo al ser interceptada por la vegetación, parte de la cual alcanza el suelo y el resto se evapora. Del agua que llega al terreno, una parte se evapora, y otra es absorbida por la cubierta vegetal, a través de sus raíces; de esta última una parte se utiliza para el crecimiento de la propia cubierta y el resto la transpira. Como es difícil distinguir lo que es evaporación de lo que es transpiración, se utiliza el concepto evapotranspiración, que engloba ambos procesos.

Al hablar de evapotranspiración hay que distinguir entre la evapotranspiración potencial (ETP), cantidad máxima de agua susceptible de ser perdida en fase vapor, por una cobertura vegetal continua específica bien alimentada de agua y la evapotranspiración real (ET o ETR).

Cuando la intensidad de la precipitación excede la velocidad a la que el agua se infiltra en el terreno, el agua comienza a escurrir sobre el terreno, llena las pequeñas depresiones causadas por las irregularidades del terreno, y al cesar las precipitaciones, se infiltra en el terreno o se evapora. El agua que no se infiltra, no se almacena en las depresiones y no se evapora, se concentra en pequeños canales y sale de la cuenca como escorrentía por la desembocadura.

Con estas hipótesis la ecuación del balance hídrico resultaría:

$$A_T = P_T - E_T$$

Donde:

A_T = Escorrentía total anual en mm.
P_T = Precipitación total anual en mm.
E_T = Evapotranspiración real anual en mm.

Siendo la seleccionada para el Método de Turc y Coutagne.

Para determinar la cantidad de agua caída sobre una cuenca (PT), se utilizan los datos puntuales de las estaciones pluviométricas próximas al entorno, utilizando cualquiera de las técnicas ya mencionadas en epígrafes anteriores.

El problema reside en la dificultad de estimar el volumen de la evapotranspiración real.

El antiguo Instituto de Hidrología del Reino Unido, hoy Center for Ecology and Hydrology, de Wallingford, UK, elaboró en los años 90 un modelo de escorrentía para España según el cual la escorrentía media anual (diferencia entre la precipitación areal y la evapotranspiración real) venía dada por una variante de la ecuación de Budyko, calibrada mediante análisis de regresión de las series temporales de caudales aforados disponibles en España. La ecuación tenía la siguiente expresión:

$$A_T = P_T * e^{-0,79\frac{ETp}{P_T}}$$

Donde:

A_T = Escorrentía total anual en mm.
P_T= Precipitación total anual en mm.
ETP = Evapotranspiración potencial anual en mm.

Puesto que en la ecuación se hace referencia a la evapotranspiración potencial, se deduce que ésta será la expresión para calcular la escorrentía total anual cuando se calcule la ETP con el resto de métodos, todos menos Turc y Coutagne que se realizaran con el anterior método de escorrentía.

CAPÍTULO 7

EVAPORACIÓN, TRANSPIRACIÓN E INFILTRACIÓN

ÍNDICE

Proceso de evapotranspiración **65**
Unidades **72**
Factores que afectan a la evapotranspiración **73**
Factores meteorológicos que determinan la ETP **75**

7. EVAPORACIÓN, TRANSPIRACIÓN E INFILTRACIÓN

En el Ciclo Hidrológico, una parte de la precipitación no produce escurrimiento superficial debido principalmente a que una fracción del volumen precipitado es evaporado por plantas, animales y superficies que contienen el agua, otra fracción es transpirado por los seres vivos y otra fracción más se infiltra en el terreno, dando origen a su escurrimiento subterráneo, por lo que resulta importante determinar la magnitud de éstas sustracciones para poder determinar la cantidad de agua que escurrirá superficialmente.

7.1. PROCESO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

7.1.1. EVAPORACIÓN

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la

evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.

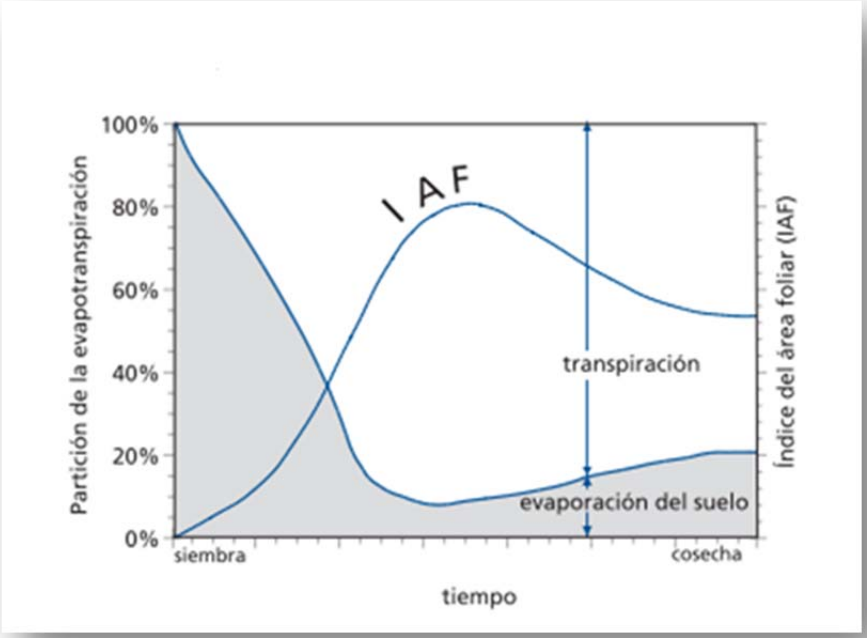


Fig. 20. Reparto de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.

- Factores que afectan a la evaporación

Se han hecho múltiples intentos para correlacionar la evaporación con ciertos factores meteorológicos que influyen directamente sobre los dos medios intercambiantes (agua y aire) con la dificultad añadida de que estos factores son dependientes entre sí.

Atendiendo a la capacidad de la atmósfera que envuelve la superficie evaporante, para admitir vapor de agua, y a la posibilidad de evaporación del agua, Dalton en 1802 dio la fórmula por la que señalaba que siendo constante las demás circunstancias, la evaporación era proporcional al déficit higrométrico, o diferencia entre la tensión de vapor saturante a la temperatura del agua y la tensión de vapor existente en el aire circundante:

$$E = K\,(e_s - e_d)$$

En esta fórmula, el coeficiente K se ajusta según la influencia de otros factores.

La tensión de vapor depende de la temperatura, y por tanto, la temperatura del aire y del agua influyen en la evaporación. La velocidad y turbulencia del viento ayuda a la renovación de la masa de aire que recibe el vapor y, en consecuencia, varía su tensión de vapor, afectando a la evaporación.

La evaporación crece al decrecer la presión atmosférica, manteniendo constantes los demás factores. Por el contrario, al aumentar la altitud, decrece la evaporación. Esta aparente contradicción se explica por la influencia de otros factores (temperatura del agua y del aire) en el ritmo de evaporación que la producida por el decrecimiento con la altitud de la presión atmosférica.

La pureza del agua es otra variable a considerar. Para una misma temperatura decrece la tensión de vapor de un agua con el aumento de los sólidos disueltos y por tanto disminuye la evaporación. Se estima en un 1% el descenso de evaporación al aumentar la concentración de sales.

Otro grupo de factores influyentes son los asociados a la naturaleza y forma de la superficie evaporante. Una superficie de agua libre presenta el mínimo de dificultades a la evaporación, que dependerá de la extensión y profundidad de la superficie. Si ambas son pequeñas, los cambios atmosféricos y el terreno, tendrán una gran influencia. En superficies extensas y profundas el terreno adyacente influye menos. La radiación solar calienta las capas superiores de agua, pero, no todo este calor se emplea en producir evaporación. Una parte calienta capas más profundas y en ellas se produce un almacenaje de calor, que cuando cesa la radiación o se enfrían las capas superiores, pasa de nuevo a ellas e incrementa la posibilidad de evaporación.

La nieve y el hielo, a veces se subliman directamente, aunque este fenómeno es difícil de medir de forma aislada. Parece ser que la sublimación aumenta considerablemente con el incremento de la velocidad del viento.

La evaporación de la humedad de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial. Al disminuir la humedad de ésta, se produce un desequilibrio y hay una atracción de humedad subyacente, que asciende por capilaridad a la superficie, prosiguiendo la evaporación hasta que el agua capilar se agota. El agua higroscópica en equilibrio con la humedad atmosférica no se evapora.

Cuando la subzona capilar alcanza la superficie del terreno, es decir, la superficie freática está muy próxima al suelo, la alimentación de agua capilar está asegurada. Solo en este caso se puede decir que el agua subterránea propiamente dicha se evapora directamente. El fenómeno continuará mientras no haya un descenso del nivel freático y consiguientemente de la subzona capilar. En suelos arenosos el ascenso capilar es del orden de 8 cm, mientras que en suelos arcillos alcanza los 25 cm aproximadamente.

La evaporación desde un suelo saturado, por la proximidad del nivel freático o, por otras causas (lluvia reciente o riego), tiene un valor cercano al de una superficie de agua libre en las mismas condiciones ambientales. Comparando medidas de evaporación de un suelo saturado y una superficie de agua libre se obtienen los siguientes resultados.

Material	Evaporación en superficie de agua libre
arenas finas saturadas	100%
margas saturadas	90%
arcillas saturadas	75-85%

Tabla 11. Evaporación desde un suelo saturado (Remerias, 1960).

Si el suelo está cubierto por vegetación, las pérdidas de agua a la atmósfera incorporan otro sumando, la transpiración. No obstante, la evaporación a partir de un suelo desnudo es superior a la del mismo suelo cubierto con vegetación pues en éste último las radiaciones solares se amortiguan. Ahora bien, las pérdidas totales de agua, serán la suma de evaporación más transpiración de la vegetación.

- Variaciones de la evaporación y órdenes de magnitud

La variación diaria de la evaporación está estrechamente ligada a la de la temperatura, pues, la presión atmosférica varía muy poco, en general durante el día. Así, en España, la evaporación es mínima en las primeras horas del día para ir creciendo a primeras horas de la tarde. Esta evolución puede alterarse de forma aleatoria e importante por las variaciones del viento.

Para un mismo mes, en distintos años las medidas pueden ser muy diferentes. En cambio, los valores anuales varían poco.

La radiación promedio anual que, como máximo llega a la superficie de la tierra es del orden de 700 cal/cm^2.día. Una superficie de agua libre refleja de un 5 a un 15% de esta radiación incidente. Por tanto, como para evaporar 1 cm^3 de agua se precisan 5858 calorías, si toda la radiación neta se aplicase a evaporar agua, se obtendría una evaporación promedio de 11 mm por día, es decir, un máximo anual de 4000 mm/año, aproximadamente.

Las mayores medidas registradas son de 3200 mm/año (Eilath, Israel).

Localización	Evaporación (mm/año)
Regiones tropicales húmedas	1500
Regiones tropicales secas	3000
Francia, excepto cuencas mediterráneas	660-700
Sur de Francia	100-1500
Lago Tchad	2260
Mar Muerto	2400
Lagos Michigan y Hurón	643
Lagos de Alta montaña (Alpes: 2000 m)	200

Tabla 12. Evapotranspiración anual para diferentes regiones. (Eilath, Israel).

La evaporación mensual varía mucho con la estación del año, siendo valores corrientes entre 20-30 mm/mes, en la estación fría y superiores a 100 mm/mes en la estación cálida.

- UNIDADES

La unidad que generalmente se emplea para evaluar la precipitación es el milímetro (mm) de altura de lámina de agua evaporada. Esta unidad se emplea con el objeto de homogeneizar las medidas de las magnitudes que intervienen en el ciclo hidrológico. Las equivalencias en el sistema métrico decimal no son las mismas que las del mm como unidad de medida de precipitación.

- INSTRUMENTOS

Evaporación de superficies de agua libre. Se mide con los evaporímetros, también conocidos como atmómetros o atmidómetros. Son de 4 tipos:

- **Tanques de evaporación**

Tienen como principio común la medida del agua perdida por evaporación de un depósito de regulares dimensiones. Los distintos modelos se diferencian entre sí en tamaño, forma y ubicación en el terreno. Están concebidos para medir la evaporación en embalses o grandes lagos y en general se sitúan próximos a ellos. Generalmente con ellos se obtienen medidas superiores a la evaporación real por lo que precisan de correctores que dependen del modelo.

Fig. 21. Tanque de evaporación

Hay varios tipos:

- **Tanque clase A**: Usado por el U.S. Weather Bureau. Depósito cilíndrico de chapa galvanizada con un diámetro de 120 cm y 25,4 cm de altura, instalado sobre un enrejado de madera, a unos 15 cm del suelo. El agua, previamente medida, debe mantenerse en días sucesivos entre dos señales a 20 y 17,5 cm del fondo del recipiente. La medición se realiza apoyando en un tubo de nivelación un tornillo micrométrico que tiene un extremo en forma de gancho cuya punta se enrasa con el nivel del agua.

El coeficiente de reducción aconsejado para pasar de las medidas del estanque a la evaporación real anual es 0,7, variando mensualmente este valor entre 0,6-0,8 (para algunas regiones de EEUU).

Fig. 22. Evaporímetro. Tanque clase A

- **Tanque enterrado**: Hay varios tipos. El más extendido en EEUU es el tipo "Colorado". Tiene forma paralelepipédica con sección recta cuadrada de lado 0,91 m. La altura es de 0,46 m. Para instalarlo se hunde en el terreno, hasta que la boca queda 10 cm sobre él. Se procura que el agua de llenado enrase el terreno.

Los coeficientes de paso a evaporación real, en EEUU varían entre 0,75 y 0,85 con un valor medio anual ligeramente inferior a 0,8. Es decir reproduce algo mejor el fenómeno, pero tiene el inconveniente de recoger rebotes de gotas de lluvia que falsean las medidas.

- Tanque flotante: Este tipo de evaporímetro pretende acercarse más a las condiciones de la superficie evaporante real. El de uso más corriente en EEUU es el de tipo "Colorado". Se sitúa flotando sobre el embalse o río en observación, con los consiguientes problemas de amarraje y estabilidad.

Como coeficiente medio anual de paso a evaporación real, se emplea 0,8 (en EEUU). También en este tipo, puede haber falseo en las medidas debido al salpicado de gotas al interior por el oleaje de la superficie líquida real, especialmente en río y grandes lagos.

- **Evaporímetros de balanza**

Es un pequeño depósito de 250 cm^2 de sección y 35 mm de profundidad, lleno de agua e instalado sobre una balanza de tipo pesa-cartas, en la que se hacen lecturas sucesivas para medir la pérdida de peso. La pequeña dimensión del depósito hace que sus paredes influyan demasiado en la evaporación. Como ventaja principal tiene el hecho de que se puede usar como evaporígrafo, que permite llevar un registro continuo de la variación de la evaporación, si se le adaptan los adecuados elementos registradores.

- **Porcelanas porosas**

Presentan al aire una esfera (Livingston) o un disco (Bellani) de porcelana porosa, en contacto con un depósito de agua que las alimenta ayudado por la presión atmosférica. Se utilizan fundamentalmente como aparatos de investigación, empleándose frecuentemente en estudios de transpiración.

- **Superficies de papel húmedo**

Juegan un papel similar a las porcelanas porosas. El modelo más usado es el evaporímetro de Piché que se basa en la idea de humedecer permanentemente un papel expuesto al aire. El depósito humedecedor es un tubo graduado, que se coloca invertido con la boca libre hacia abajo. Esta se tapa con un papel secante sujeto por medio de una arandela metálica. La evaporación produce el secado del papel y una succión de agua del depósito. Se medie el descenso de agua en el tubo.

Fig. 23. Evaporímetro de Piché.

Normalmente, el evaporímetro Piché se coloca en el interior de la garita meteorológica. Algunas correlaciones entre medidas en un evaporímetro Piché y en un estanque flotante, obligan a multiplicar las medidas Piché por 0,8 para igualar las del estanque. Otros autores dan valores entre 0,45 y 0,60 para el mismo coeficiente. Realmente, este tipo de evaporímetro da grandes errores.

- **Medida de la evaporación desde suelos sin vegetación**

  - Estanques lisimétricos y lisímetros

  - Parcelas experimentales

Ambos tipos se utilizan también para medir evapotranspiración cuando el suelo esté cubierto por vegetación.

7.1.2. TRANSPIRACIÓN

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 1). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo.

Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

7.1.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo.

Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del de 90% de la ET ocurre como transpiración.

7.2. UNIDADES

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

Como una hectárea tiene una superficie de 10000 m^2 y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m^3 de agua por hectárea. Es decir 1 mm $día^{-1}$ es equivalente 10 $m^3\ ha^{-1}\ día^{-1}$.

La altura del agua se puede también expresar en términos de la energía recibida por unidad de área. Esto último se refiere a la energía o al calor requerido para vaporizar el agua. Esta energía, conocida como el calor latente de vaporización (λ), es una función de la temperatura del agua. Por ejemplo, a 20°C, λ tiene un valor de cerca de 2,45 MJ Kg-1. Es decir 2,45 MJ son necesarios para vaporizar 1 kilogramo ó 0,001 m3 de agua.

Por lo tanto, un aporte de energía de 2,45 MJ por m^2 puede vaporizar 0,001 m ó 1 milímetro de agua, y entonces 1 milímetro de agua es equivalente a 2,45 MJ m^{-2}. La evapotranspiración expresada en unidades del MJ $m^{-1}\ día^{-1}$ se representa por λ ET, el flujo del calor latente.

La tabla 13 resume las unidades usadas para expresar la evapotranspiración y los factores de conversión entre ellas.

	Altura de agua	volumen por unidad de área		energía por unidad de área *
	mm $día^{-1}$	$m^3\ ha^{-1}\ día^{-1}$	$ha^{-1}\ día^{-1}$	MJ $m^{-2}\ día^{-1}$
1 mm $\boldsymbol{día^{-1}}$	1	10	0,116	2,45
1 $\boldsymbol{m^3\ ha^{-1}\ día^{-1}}$	0,1	1	0,012	0,245
1 $\boldsymbol{l\ s^{-1}\ ha^{-1}}$	8,64	86,4	1	21,17
1 MJ $\boldsymbol{m^{-2}\ día^{-1}}$	0,408	4,082	0,047	1

Tabla 13. Factores de conversión para expresar evapotranspiración 1.

* Para el agua con una densidad de 1 000 kilogramos m-3 y a 20 °C.

7.3. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan a la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 24 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.

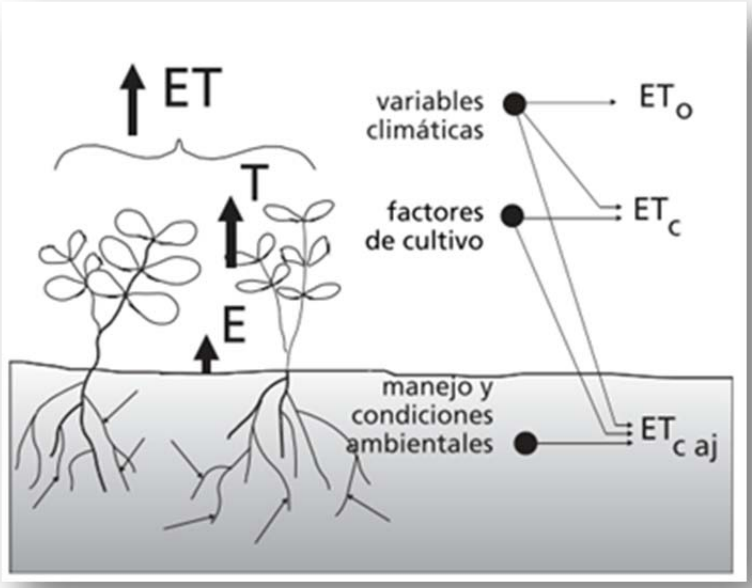


Fig. 24. Factores que afectan a la evapotranspiración.

7.3.1. VARIABLES CLIMÁTICAS

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar. La ETo se describe más adelante en este Capítulo.

7.3.2. FACTORES DE CULTIVO

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre

cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

7.3.3. MANEJO Y CONDICIONES AMBIENTALES

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Una barrera rompevientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ETc. Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

7.4. FACTORES METEOROLÓGICOS QUE DETERMINAN LA ET

Los métodos para calcular la evapotranspiración partiendo de datos meteorológicos requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Otros parámetros se relacionan con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas.

Los datos meteorológicos se pueden expresar en diferentes unidades. Los factores de conversión entre varios sistemas de unidades y las unidades estándar del S.I.

Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante. Los principales parámetros meteorológicos que se deben considerar se presentan a continuación.

7.4.1 RADIACIÓN SOLAR

El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo.

Conceptos

7.4.1.1 RADIACIÓN EXTRATERRESTRE (RA)

La radiación que choca a una superficie perpendicular a los rayos del sol en el extremo superior de la atmósfera terrestre, se llama constante solar, y tiene un valor aproximado de 0,082 MJ m-2 min-1. La intensidad local de la radiación, sin embargo, está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la superficie de la atmósfera. Este ángulo cambia durante el día y es diferente en diversas latitudes y en diversas épocas del año. La radiación solar recibida en la parte superior de la atmósfera terrestre sobre una superficie horizontal se conoce como radiación (solar) extraterrestre, Ra.

Si el sol se encuentra directamente encima de la cabeza, el ángulo de incidencia es cero y la radiación extraterrestre es 0,082 MJ m-2 min-1. Así como las estaciones cambian, la posición del sol, la longitud del día y la radiación extraterrestre también cambian. La radiación extraterrestre es entonces una función de la latitud, la época del año y la hora del día. Los valores de Ra a lo largo del año para diversas latitudes se presentan en la Tabla 27.

7.4.1.2 RADIACIÓN SOLAR O DE ONDA CORTA (RS)

Cuando la radiación atraviesa la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, parte de ella se dispersa, refleja o absorbe por los gases, las nubes y el polvo atmosféricos.

La cantidad de radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre se conoce como radiación solar, Rs. Como el sol emite energía por medio de ondas

electromagnéticas caracterizadas por longitudes de onda cortas, la radiación solar también se conoce como radiación de onda corta.

En un día despejado, Rs constituye aproximadamente el 75% de la radiación extraterrestre. En un día nublado este valor disminuye debido a que la radiación se dispersa en la atmósfera. Sin embargo incluso con una nubosidad muy densa, cerca del 25% de la radiación extraterrestre puede todavía llegar a la superficie terrestre principalmente como radiación difusa de la atmósfera. La radiación solar también se conoce como radiación global, que es la suma de radiación directa de la onda corta del sol y de la radiación difusa resultante de todos los otros ángulos.

7.4.1.3 RADIACIÓN RELATIVA DE ONDA CORTA (R_s/R_{so})

La radiación relativa de onda corta es el cociente de la radiación solar (R_s) y de la radiación solar de un día despejado (R_{so}). R_s es la radiación solar que realmente llega a la superficie terrestre en un determinado período, mientras que R_{so} es la radiación solar que alcanzaría la misma superficie durante el mismo período si el cielo estuviera despejado.

La radiación relativa de onda corta es una manera de expresar la nubosidad de la atmósfera; cuanto más nublado este el cielo, más pequeño será su valor. El cociente varía aproximadamente entre 0,33 (nubosidad elevada) y 1 (cielo despejado).

7.4.1.4 DURACIÓN SOLAR RELATIVA (N/N)

La duración solar relativa es otro cociente que expresa la nubosidad atmosférica. Es el cociente de la duración real de la insolación, n, y la duración máxima posible de la insolación o de la luz del día N. Bajo condiciones de ausencia de nubosidad la duración real de la insolación es igual a la insolación máxima posible (n = N) y el cociente es uno, mientras que en días muy nublados n y el cociente puede tomar el valor de cero. En ausencia de datos directos de R_s, la duración solar relativa, n/N, se utiliza para derivar la radiación solar de la radiación extraterrestre.

Como ocurre con la radiación extraterrestre, la duración del día, N, depende de la posición del sol y es por lo tanto una función de la latitud y de la fecha. Los valores diarios de N a través del año, para diversas latitudes, se presentan en la Figura 25.

7.4.1.5 ALBEDO (α) Y RADIACIÓN NETA SOLAR (R_{ns})

Una cantidad considerable de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se refleja en ella. La fracción, α, de la radiación solar que es reflejada por la superficie se conoce como albedo. El albedo es muy variable de acuerdo al tipo de superficie y el ángulo de incidencia o la pendiente de la superficie terrestre. Su valor puede ser tan elevado como 0,95 para la nieve recientemente caída y tan bajo como 0,05 para un suelo desnudo y húmedo. Una cubierta verde de vegetación tiene un albedo de entre 0,20 a 0,25. Para el cultivo de referencia, se asume que α tiene un valor de 0,23.

La radiación neta solar, R_{ns}, es la fracción de la radiación solar R_s que no se refleja en la superficie. Su valor es (1-α) R_s.

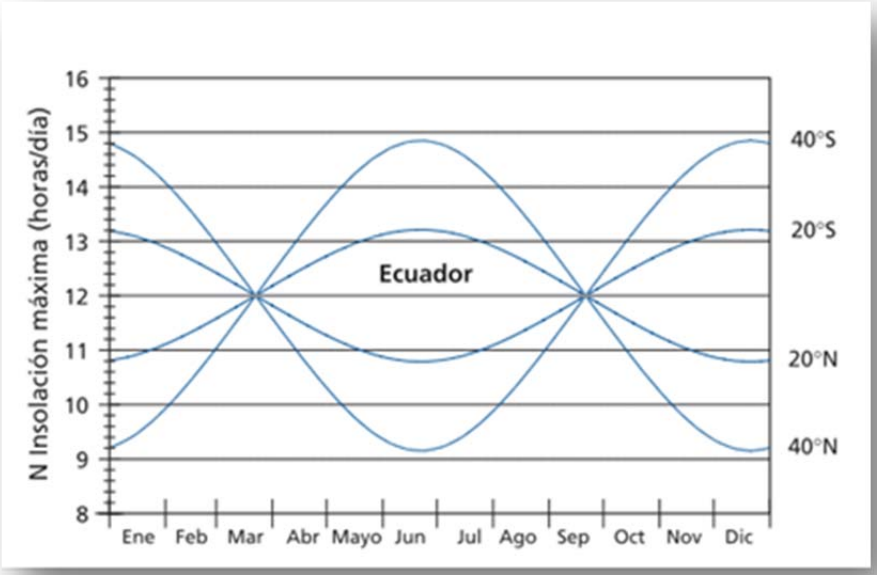


Fig. 25. Variación anual de las horas de luz del día ´´N`` en el ecuador.

7.4.1.6 RADIACIÓN NETA DE ONDA LARGA (RNL)

La radiación solar absorbida por la tierra se convierte en energía térmica. La tierra pierde esta energía por medio de varios procesos, entre los cuales se encuentra la emisión de radiación. La tierra, que tiene una temperatura mucho más baja que el sol, emite energía radiante con longitudes de onda más largas que el sol. Por ello, la radiación terrestre se conoce como radiación de onda larga. La radiación de onda larga emitida por el planeta es absorbida por la atmósfera o perdida hacia el espacio. La radiación de onda larga recibida por la atmósfera aumenta su temperatura. Por consiguiente, la atmósfera irradia también energía, según lo ilustrado en la Figura 26.

Parte de la radiación emitida por la atmósfera se dirige nuevamente hacia la superficie terrestre. Por lo tanto, la superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga, Rnl. Como la radiación saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación entrante, Rnl representa una pérdida de energía.

7.4.1.7 RADIACIÓN NETA (RN)

La radiación neta, Rn, es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (Rns) y la radiación de onda larga saliente neta (Rnl) (Figura 26). La Rn es normalmente

positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para Rn es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas.

7.4.1.8 FLUJO DE CALOR DEL SUELO

En las estimaciones de evapotranspiración, se deben considerar todos los términos del balance energético. El flujo del calor del suelo, G, es la energía que se utiliza para calentar el suelo. G tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría. Aunque el flujo calórico del suelo es pequeño comparado con Rn y puede ser no considerado con frecuencia, la cantidad de energía ganada o perdida por el suelo en este proceso teóricamente debe restarse o agregarse a Rn para estimar la evapotranspiración.

7.4.1.9 UNIDADES

La unidad estándar para expresar la energía recibida en una unidad de superficie por unidad de tiempo es el megajoule por metro cuadrado por día (MJ $m^2 día^{-1}$). En algunos boletines meteorológicos pueden utilizarse otras unidades o la radiación puede estar incluso expresada en unidades ya no aceptadas dentro de las unidades estándares del S.I., tales como las calorías $cm^2 día^{-1}$.

Evaporación equivalente [mm $día^{-1}$] = 0,408 x Radiación [MJ $m^2 día^{-1}$]

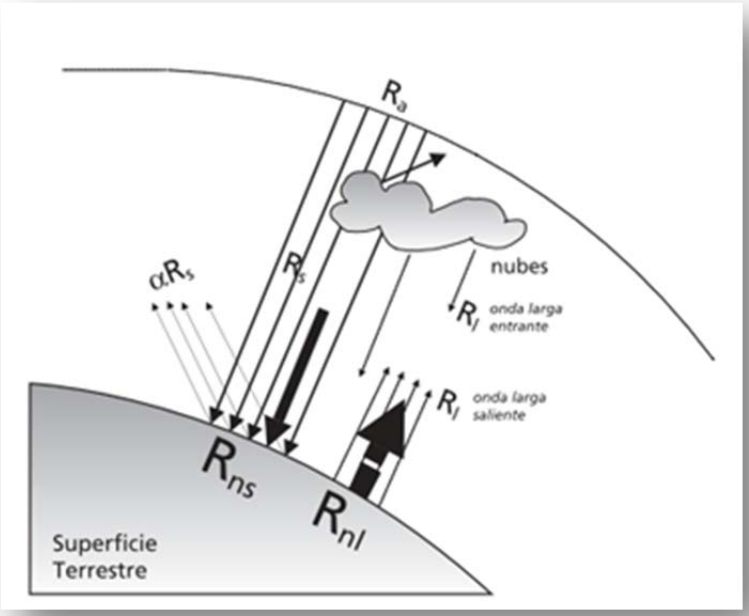


Fig. 26. Componentes de la radiación.

Las unidades comúnmente utilizadas, expresan la energía recibida en una superficie por unidad de tiempo. Los factores de conversión entre diversas unidades se resumen en la Tabla 14.

	Factor multiplicador para obtener la energía recibida en una superficie por unidad de tiempo			
	MJ $m^{-2}\ día^{-1}$	$J\ cm^{-2}$ $día^{-1}$	cal $cm^{-2}\ día^{-1}$	$W\ m^{-2}$
1 MJ $\boldsymbol{m^{-2}\ día^{-1}}$	1	100	23,9	11,6
1 $\boldsymbol{cal\ cm^{-2}\ día^{-1}}$	$4{,}1868 * 10^{-2}$	4,1868	1	0,485
1 $\boldsymbol{W\ m^{-2}}$	0,0864	8,64	2,06	1
1 mm $\boldsymbol{día^{-1}}$	2,45	245	58,5	28,4

Tabla 14. Factores de conversión para expresar evapotranspiración 2.

7.4.1.10 MEDICIÓN

La radiación solar puede ser medida con piranómetros, radiómetros o solarímetros. Los instrumentos contienen un sensor instalado en una superficie horizontal que mide la intensidad de la radiación solar total, es decir, la suma de la radiación solar directa y la difusa que ocurre cuando el cielo está cubierto. El sensor es protegido y mantenido en una atmósfera seca usando una bóveda de cristal que se limpia regularmente.

La radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga pueden ser medidas registrando la diferencia de salida entre los sensores dirigidos hacia arriba y hacia abajo. En un radiómetro neto, las bóvedas de cristal son substituidas por bóvedas del polietileno que tienen un rango de sensibilidad para onda corta y para onda larga.

Cuando no se cuenta con piranómetros, la radiación solar puede ser generalmente estimada de la duración de la insolación. La duración real de la insolación (horas sol reales), n, se mide con un heliógrafo. Este instrumento registra períodos de sol brillante usando un globo de cristal que actúa como lente. Los rayos solares se concentran en un punto focal que quema una parte de una tarjeta especialmente calibrada para ello y colocada concéntricamente con la esfera. El movimiento del sol cambia el punto focal a lo largo del día y un rastro aparece en la tarjeta. Si se nubla, se interrumpe el rastro. Las horas de sol brillante son indicadas por la longitud de los segmentos del rastro.

La cantidad de calor transmitida por el suelo, G, se puede medir con sistemas de placas de flujo de calor en el suelo y con termopares.

7.4.1.11 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

7.4.1.11.1 Radiación extraterrestre para periodos diarios ($\boldsymbol{R_a}$)

La radiación extraterrestre, R_a, para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s sen(\varphi) sen(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\, sen(\omega)]$$

Donde:

R_a: Radiación extraterrestre [MJ m-2 día-1].
G_{sc} : Constante solar = 0,082 MJ m-2 min-1.
d_r : Distancia relativa inversa Tierra-Sol.
ω_s : Ángulo de radiación a la puesta del sol [rad].
φ : Latitud [rad].
δ : Declinación solar [rad].

R_a se expresa en MJ m-2 día-1. La evaporación equivalente en mm día-1 se obtiene multiplicando Ra por 0,408. La latitud, φ, expresada en radianes es positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur. La conversión de grados decimales a radianes se da por:

$$radianes = \frac{\pi}{180}(grados\ decimales)$$

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, d_r, y la declinación solar, δ, están dadas por:

$$d_r = 1 + 0{,}033 * \cos(\frac{2\pi}{365}J)$$

$$\delta 0{,}409 * sen\left(\frac{2\pi}{365}J - 1{,}39\right)$$

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s, se da por:

$$\omega_s = arcos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$

Como la función de los arccos no está disponible en todos los lenguajes de programación, el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol se puede también calcular usando la función arctan:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - arctan\left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0,5}}\right]$$

Donde:

$$X = 1 - [\tan(\varphi)^2 \tan(\delta)^2]$$

$$y\ X = 0{,}00001\ si\ X \leq 0$$

Los valores de Ra para diversas latitudes se presentan en la Tabla 27. Estos valores representan Ra en el día 15 de cada mes. Estos mismos valores se desvían de valores promedio de los valores diarios del mes en menos del 1% para todas las latitudes durante

períodos libres de hielo y se incluyen para simplificar el cálculo. Estos valores se desvían levemente de los valores en los Cuadros Smithsonianos. Para los meses invernales en latitudes mayores a 55° (N o S), las ecuaciones de Ra tienen validez limitada. Se debe comparar con los valores presentados en los Cuadros Smithsonianos para evaluar posibles desviaciones.

7.4.1.11.2 Radiación extraterrestre para periodos horarios o menores (Ra)

Para períodos horarios o menores, el ángulo solar al principio y al final del período deben ser considerados al calcular Ra:

$$R_a = \frac{12 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) sen(\varphi) sen(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\, sen(\omega)]$$

Donde:

R_a: Radiación extraterrestre [MJ m-2 día-1].
G_{sc} : Constante solar = 0,082 MJ m-2 min-1.
d_r : Distancia relativa inversa Tierra-Sol.
ω_1 : Ángulo de radiación al inicio del periodo [rad].
ω_2 : Ángulo de radiación al final del periodo [rad].
φ : Latitud [rad].
δ : Declinación solar [rad].

Los ángulos de radiación solar al inicio y al final del período están dados por:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi * t_1}{24}$$

$$\omega_2 = \omega - \frac{\pi * t_1}{24}$$

Donde:

ω : Ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado [rad].
t_1 : Duración del periodo considerado [horas] p.e., 1 para periodos horarios y 0,5 para periodos de 30 minutos.

El ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado se calcula por:

$$\omega = \frac{\pi}{12}[(t + 0{,}06667(L_z - L_m) + S_c)] - 12$$

Donde:

t : Hora estándar en el punto medio del periodo considerado [hora], p.e. para un periodo entre las 14:00 y las 15:00 horas, t = 14,5
L_z : Longitud del centro de la zona de tiempo local [grados oeste de Greenwich].
L_m : Longitud de la zona de medición [grados oeste de Greenwich].
S_c : Corrección estacional para el tiempo solar [horas].

Por supuesto, ω < -ω_ss o ω > ω_s, indica que el sol está bajo del horizonte de manera que, por definición, Ra es cero.

La corrección estacional para el tiempo solar.

$$S_c = 0{,}1645 * sen(2b) - 0{,}1255 * \cos(b) - 0{,}025 * sen(b)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}$$

Donde J es el número de día en el año.

6.4.1.11.3 Duración máxima de la insolación (N)

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s$$

Donde ω_s es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol.

7.4.1.11.4 Radiación solar ($\boldsymbol{R_s}$)

Si no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, R_s, ésta puede ser calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación:

$$R_s = \left(a_s + b_s\frac{n}{N}\right)R_a$$

Donde:

R_s: Radiación solar o de onda corta [MJ m-2 día-1].
n : Duración real de la insolación [horas].
N: Duración máxima posible de la insolación [horas].
n/N: Duración relativa de la insolación.
R_a : Radiación extraterrestre [MJ m-2 día-1].
a_s : Constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n = 0).
a_s+ b_s : Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n = N).

R_s, se expresa en MJ m-2 día-1. La evaporación equivalente correspondiente en mm día-1 se obtiene multiplicando R_s por 0,408. Dependiendo de las condiciones atmosféricas (p.e. humedad, polvo) y de la declinación solar (latitud y mes), los valores pueden variar. En casos en que no disponga de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de as= 0,25 y de bs =0,50.

7.4.1.11.5 Radiación solar en un día despejado ($\boldsymbol{R_{so}}$)

La radiación en días despejados, R_{so}, cuando n = N, puede ser calculada de la siguiente forma:

- Para localidades cerca al nivel del mar o cuando se dispone de valores calibrados de as y bs:

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a$$

Donde:

R_{so}: Radiación solar en un día despejado [MJ m-2 día-1].
$a_s + b_s$: Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre en días de cielo despejado (n = N).

- En casos en que los valores calibrados de as y bs no estén disponibles

$$R_{so} = (0{,}75 + 2 * 10^{-5}z)R_a$$

Donde:

z : Elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].

7.4.1.11.6 Radiación neta solar o de onda corta ($\boldsymbol{R_{ns}}$)

La radiación neta de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1 + \alpha)R_s$$

Donde:

R_{ns}: Radiación neta solar o de onda corta [MJ m-2 día-1].
α: Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional].
R_s: Radiación solar entrante [MJ m-2 día-1].

7.4.1.11.7 Radiación neta de onda larga ($\boldsymbol{R_{nl}}$)

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. Se debe tener en cuenta que el flujo de energía neta que sale de la superficie terrestre es menor que la calculada y dada por la ley de StefanBoltzmann debido a la absorción y radiación devuelta del cielo. El vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono y el polvo absorben y emiten radiación de onda larga. Por ello se deben conocer sus concentraciones para determinar el flujo saliente neto. Como la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, la ley de Stefan-Boltzmann se corrige

por estos dos factores cuando se estima el flujo saliente neto de la radiación de onda larga. De tal modo que se asume que las concentraciones de los otros factores de absorción de radiación son constantes:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{{T_{max,k}}^4 + {T_{min,k}}^4}{2} \right] \left(0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a}\right) \left(1{,}35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right)$$

Donde:

R_{nl}: Radiación neta de onda larga [MJ m-2 día-1].
σ: Constante de Stefan-Boltzmann [4,903 x 10-9 MJ K-4 m-2 día-1].
$T_{max,k}$: Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [K = °C + 273,16].
$T_{min,k}$: Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [K = °C + 273,16].
e_a: Presión de vapor real [kPa].
R_s/R_{so}: Radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1,0).
R_s: Radiación solar medida o calculada [MJ m-2 día-1].
R_{so}: Radiación en un día despejado [MJ m-2 día-1].

Comúnmente, en la ecuación de Stefan-Boltzmann se utiliza el promedio de la temperatura máxima del aire elevada a la cuarta potencia y de la temperatura mínima del aire elevada a la cuarta potencia para periodos de 24 horas. El término (0,34-0,14$\sqrt{\text{ea}}$) expresa la corrección para la humedad del aire, y será más pequeño con valores más elevados de humedad. El efecto de la nubosidad se expresa por (1,35 Rs/Rso – 0,35). El término llega a ser más pequeño con mayor nubosidad y por lo tanto Rs disminuye. Cuanto más pequeños son los términos de corrección, más pequeño es el flujo saliente neto de radiación de onda larga. Observe que los valores del término Rs/Rso deben ser menores que 1.

7.4.1.11.8 Radiación neta ($\boldsymbol{R_n}$)

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{ns}):

$$R_n = R_{ns}\text{-}R_{nl}$$

7.4.1.11.9 Flujo del calor del suelo (G)

Se cuenta con diversos modelos complejos para describir flujo del calor del suelo. Como el flujo del calor del suelo es pequeño comparado a la Rn, particularmente cuando la superficie está cubierta con vegetación y los periodos de tiempo de cálculo son de 24 horas o más, un procedimiento simple del cálculo se presenta aquí para periodos largos de tiempo, basados en la idea de que la temperatura del suelo tiene similar tendencia a la de la temperatura del aire:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

Donde:

G : Flujo de calor del suelo [MJ m-2 día-1].
c_s: Capacidad calorífica del suelo [MJ m-3 °C-1].
T_i : Temperatura del aire en el tiempo i [°C].
T_{i-1}: Temperatura del aire en el tiempo i-1 [°C].
Δt: Intervalo de tiempo considerado [días].
Δz: Profundidad efectiva del suelo [m].

Como la variación de la temperatura del suelo se retrasa con relación a los cambios de la temperatura del aire, la temperatura media por un período más largo al estudiado debe ser considerado para determinar el flujo diario del calor del suelo, es decir, Δt debe exceder un día. La profundidad de la penetración de la onda de la temperatura es determinada por la duración del intervalo del tiempo. La profundidad efectiva del suelo, Δz, es solamente 0,10-0,20 m para un intervalo del tiempo de uno o pocos días pero puede ser de 2 m o más por períodos mensuales. La capacidad calorífica del suelo se relaciona con su contenido mineral y su contenido de agua.

- Para periodos diarios y decadiarios:

Como la magnitud del flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada y entonces:

$$G_{día} = 0$$

- Para períodos mensuales:

Si se asume una capacidad calorífica constante del suelo de 2,1 MJ m-3 °C-1 y una profundidad media de suelo, la Ecuación 41 se puede utilizar para derivar G para períodos mensuales:

$$G_{mes,i} = 0{,}07(T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1})$$

O, si no se conoce el valor de $T_{mes,i+1}$:

$$G_{mes,i} = 0{,}14(T_{mes,i} - T_{mes,i-1})$$

Donde:

$T_{mes,i}$: Temperatura media del aire en el mes i [°C].
$T_{mes,i-1}$: Temperatura media del aire en el mes i -1 [°C].
$T_{mes,i+1}$: Temperatura media del aire en el mes i +1 [°C].

Para periodos horarios o más cortos:

Para los cálculos horarios (o más cortos), G bajo una cubierta densa de pasto no correlaciona bien con la temperatura del aire. El valor horario de G se puede aproximar durante períodos de luz por:

$$G_{hr} = 0{,}1R_n$$

Y durante los periodos nocturnos:

$$G_{hr} = 0{,}5R_n$$

Cuando el suelo se calienta, el flujo del calor del suelo, G, es positivo. La cantidad de energía requerida para este proceso es sustraída de R_n para estimar la evapotranspiración.

7.4.2 TEMPERATURA DEL AIRE

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.

La agrometeorología se ocupa de la temperatura del aire al nivel del cultivo. En estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, la temperatura del aire se mide dentro de abrigos meteorológicos (pantallas de Stevenson o casetas ventiladas) a 2 m sobre la superficie, de acuerdo a los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Los abrigos meteorológicos se diseñan para proteger los instrumentos contra la exposición directa a la radiación solar. La construcción con persianas permite el movimiento libre del aire alrededor de los instrumentos. La temperatura del aire se mide con termómetros o termopares instalados en el abrigo. Los termómetros de mínima y máxima registran la temperatura mínima y máxima del aire en un período de 24 horas. Los termógrafos generan gráficos de las temperaturas instantáneas durante un día o una semana. Las estaciones meteorológicas electrónicas comúnmente hacen un muestreo de la temperatura del aire cada minuto y entregan promedios horarios además de los valores máximo y mínimo en 24 horas.

Debido a la relación no lineal de la humedad con la temperatura, la presión de vapor para cierto período se debe calcular como la media entre la presión de vapor bajo la temperatura máxima y la presión de vapor bajo la temperatura mínima del aire en ese periodo. La temperatura máxima diaria del aire (Tmax) y la temperatura mínima diaria del aire (Tmin) son, respectivamente, la máxima y la mínima temperatura del aire observadas durante un período de 24 horas, desde la medianoche. Tmax y Tmin por períodos más largos tales como semanas, diez días o meses se obtienen dividiendo la suma de los valores diarios respectivos por el número de días del período. La temperatura media diaria del aire (Tmedia) se emplea para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor y del impacto de la densidad media del aire (Pa) pues el efecto de las variaciones de temperatura en el valor de estos parámetros climáticos es pequeño. Para la estandardización, Tmedia para períodos de 24 horas se define como el promedio de las temperaturas máxima (Tmax) y mínima diaria (Tmin) en lugar del promedio de las mediciones horarias de temperatura.

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

La temperatura se expresa en grados centígrados (°C) o Fahrenheit (°F). El Cuadro de conversión se presenta en el Anexo 1. En algunos procedimientos del cálculo, la temperatura se debe expresar en grados Kelvin (K), los que se obtienen agregando 273,16 a

la temperatura expresada en grados centígrados (en la práctica K = °C + 273,16). La escala centígrada y la Kelvin tienen la misma escala de intervalo.

7.4.3 VELOCIDAD DEL VIENTO

El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante.

Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye.

El efecto combinado de los factores climáticos que afectan la evapotranspiración se ilustra en la Figura 27 para dos condiciones climáticas diferentes. La demanda evapotranspiratoria es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras que el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Por otra parte, bajo condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad del aire y la presencia de nubes hacen que la tasa de evapotranspiración sea más baja. El aumento de la velocidad del viento para las dos condiciones climáticas presentadas, afecta la evapotranspiración en diferente forma como muestra la pendiente de las curvas en la Figura 27. Cuanto más seca esté la atmósfera, más grande será el efecto sobre la ET y mayor es la pendiente de la curva. Para las condiciones húmedas, el viento puede sustituir el aire saturado solamente por aire levemente menos saturado y así reducir la energía térmica. Por tanto, bajo condiciones húmedas la velocidad del viento afecta la evapotranspiración en un grado mucho menos importante que bajo climas áridos en los que variaciones pequeñas en la velocidad del viento pueden dar lugar a importantes variaciones en la evapotranspiración.

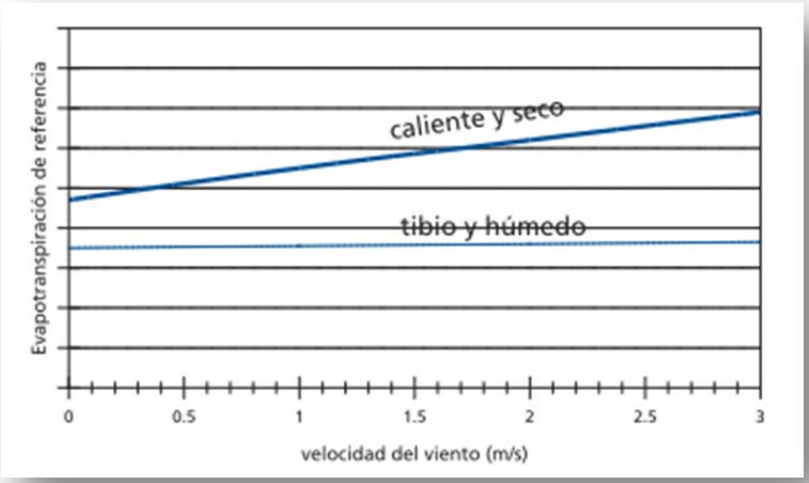


Fig. 27. Efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración.

7.4.3.1 MEDICIÓN

El viento se caracteriza por su dirección y su velocidad. La dirección del viento se refiere a la dirección de la cual el viento está soplando. Para el cómputo de la evapotranspiración, la velocidad del viento es una variable importante. Como la velocidad del viento en una localidad dada varía con el tiempo, es necesario expresarla como el promedio sobre un intervalo determinado de tiempo. La velocidad del viento se mide en metros por segundo (m s-1) o kilómetros por día (km día-1).

La velocidad del viento se mide con los anemómetros. Los anemómetros usados comúnmente en las estaciones meteorológicas se componen de cazoletas o propulsores que giran sobre un eje gracias a la fuerza del viento. El conteo del número de revoluciones en un periodo dado, permite determinar la velocidad promedio del viento en dicho período.

7.4.3.2 RELACIÓN DEL VIENTO CON LA ALTURA

La velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tienen valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con altura.

Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10 m en meteorología y 2 ó 3 m en agrometeorología. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos de velocidad del viento, obtenidos de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2m, se puede usar una relación logarítmica:

$$u_2 = u_z \frac{4{,}87}{\ln(67{,}8z - 5{,}42)}$$

Donde:

u_2 : Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m s-1].
u_z: Velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m s-1].
z : Altura de medición sobre la superficie [m].

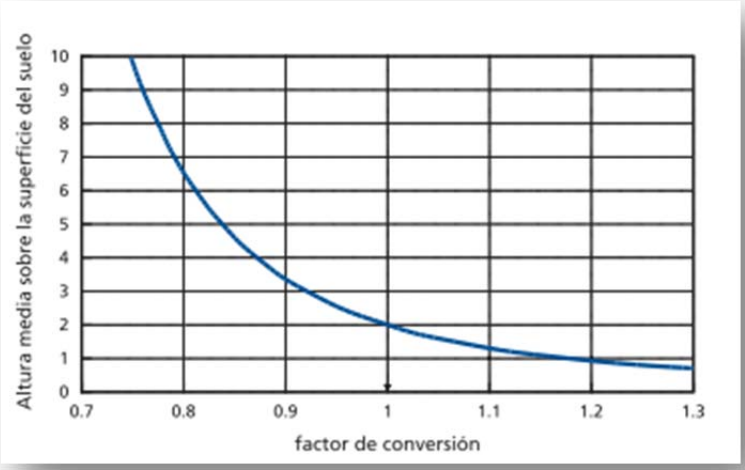


Fig. 28. Factor de conversión para velocidad del viento medida a cierta altura sobre el nivel del suelo a la velocidad del viento en la altura estándar de 2m.

7.4.4 CONSTANTE PSICROMÉTRICA (γ)

La constante psicrométrica, γ, se calcula por:

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} = 0{,}665 * 10^{-3}$$

Donde:

γ: Constante psicrométrica [kPa $°C^{-1}$].
P: Presión atmosférica [kPa].
λ: Calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg^{-1}].
cp: Calor específico a presión constante, 1,013 x 10-3 [MJ kg^{-1} $°C^{-1}$].
ε: Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

El calor específico es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una unidad de masa de aire en 1° C a presión constante. Su valor depende de la composición del aire, fundamentalmente de su humedad. Para condiciones atmosféricas medias se puede utilizar el valor cp = 1,013 x 10-3 MJ kg-1 °C-1. Dado que se aplica un valor medio de presión atmosférica en cada localidad, la constante psicrométrica también se mantiene constante para cada localidad.

7.4.5 PRESIÓN ATMOSFÉRICA (P)

La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicrométrica. Este efecto es, sin embargo, pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor medio para una localidad es suficiente.

Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C:

$$P = 101{,}3\left(\frac{293 - 0{,}0065z}{293}\right)^{5{,}26}$$

Donde:

P: Presión atmosférica [kPa].
Z: Elevación sobre el nivel del mar [m].

7.4.6 HUMEDAD DEL AIRE

Mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de

que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración.

En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

Conceptos

El contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. En agrometeorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.

7.4.6.1 PRESIÓN DE VAPOR

El vapor de agua es un gas y su presión contribuye a la presión atmosférica total. La cantidad de vapor de agua en el aire se relaciona directamente con la presión parcial ejercida por ese vapor de agua en el aire y esta es por lo tanto una medida directa del contenido de vapor de agua del aire.

Bajo las unidades estándar del S.I., la presión ya no es expresada en centímetros de agua, milímetros de mercurio, bares, atmósferas, etc., sino en pascales (Pa).

Mientras que un pascal se refiere a una fuerza relativamente pequeña (1 newton) aplicada a una superficie relativamente grande (1 m^2), múltiplos de esta unidad básica se utilizan frecuentemente. La presión de vapor se expresa en los kilopascales.

Cuando un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que vuelven a la fuente de agua. En ese momento, se considera que el aire está saturado puesto que no puede almacenar ninguna molécula de agua adicional. La presión correspondiente se llama presión de saturación de vapor (e°(T)). La cantidad de moléculas de agua que se pueden almacenarse en el aire depende de la temperatura (T). Cuanto más alta es la temperatura del aire, más alta es la capacidad de almacenar vapor de agua y más alta es la presión de saturación de vapor (Figura 29).

Como se puede observar en la Figura 29, la pendiente de la curva cambia exponencialmente con la temperatura. A temperaturas bajas, la pendiente es pequeña y varía levemente con el incremento de temperatura. A temperaturas elevadas, la pendiente es mayor y pequeños cambios de temperatura producen grandes cambios grandes en la pendiente. La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, Δ, es un parámetro importante para la descripción de la vaporización y se utiliza en algunas ecuaciones de cálculo de ETo con datos climáticos.

La presión real de vapor (ea) es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire. Cuando el aire no se satura, la presión real de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación. La diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor

se llama déficit de presión de vapor o déficit de saturación y es un indicador preciso de la real capacidad evaporativa del aire.

7.4.6.2 TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO

La temperatura del punto de rocío o punto de condensación es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarse. La presión real de vapor del aire es la presión de saturación de vapor en la temperatura del punto de rocío. Cuanto más seco esté el aire, más grande será la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío.

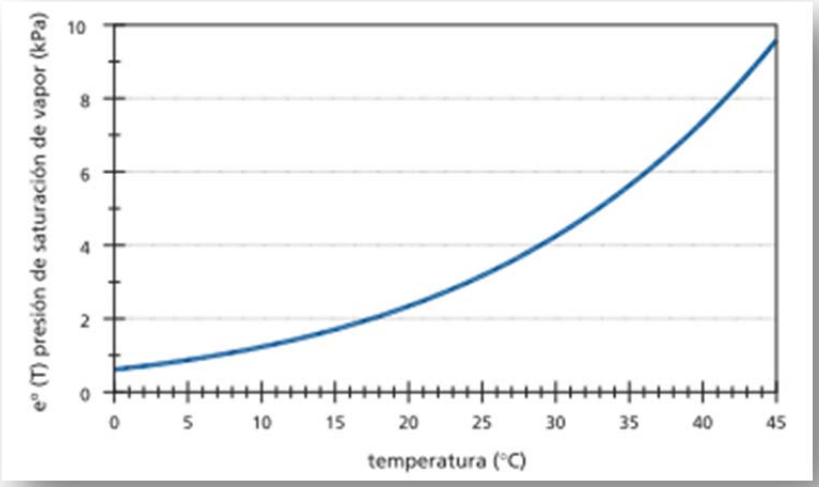


Fig. 29. Presión de vapor en función de la temperatura.

7.4.6.3 HUMEDAD ABSOLUTA

Es una mezcla de vapor de agua y de aire seco, la humedad absoluta es el cociente entre la masa de vapor de agua, mv, y el volumen, v, de aire líquido que la contiene. Por lo general, se expresa en gramos por centímetro cúbico. La masa de un volumen de gas, a temperatura constante, es proporcional a su presión, lo cual quiere decir que la presión de vapor, expresada en unidades barométricas, es una medida indirecta de la humedad absoluta.

La humedad absoluta aumenta cuando un volumen de vapor de agua se incorpora al aire, como, por ejemplo, en el caso de la evaporación, y disminuye al reducirse el vapor, como en el caso de la precipitación. También puede modificarse la humedad absoluta haciendo variar el volumen de aire que la contiene.

7.4.6.4 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor (e°(T)) a la misma temperatura (T):

$$HR = \frac{e_a}{\mathrm{e°(T)}} * 100$$

La humedad relativa es el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. Es adimensional y se expresa comúnmente como porcentaje. Aunque la presión real de vapor puede ser relativamente constante a lo largo del día, la humedad relativa fluctúa entre un máximo al amanecer y un mínimo a primeras horas de la tarde (Figura 30). La variación de la humedad relativa se produce porque la presión de saturación de vapor depende de la temperatura del aire. Como la temperatura del aire cambia durante el día, la humedad relativa también cambia substancialmente.

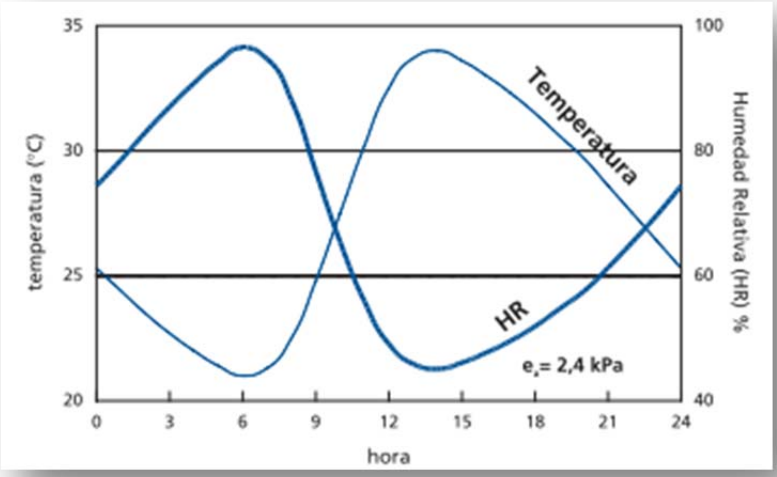


Fig. 30. Variación de la humedad relativa durante un periodo de 24 horas para una presión real de vapor constante de 2,4 kPa.

7.4.6.5 MEDICIÓN HUMEDAD

No es posible medir directamente la presión real de vapor. La presión de vapor se deriva comúnmente de la humedad relativa o de la temperatura del punto de rocío.

La humedad relativa se mide directamente con el higrómetro. La medición se basa en las propiedades de algunos materiales como el cabello humano, que se contrae o extiende en respuesta a cambios en humedad del aire, o por medio de una placa eléctrica que es sensible a los cambios de humedad. La presión de vapor puede ser medida indirectamente con psicrómetros que miden la diferencia de temperatura entre dos termómetros, conocidos como termómetro de bulbo seco y termómetro de bulbo húmedo. El termómetro de bulbo seco mide la temperatura del aire. El bulbo del termómetro de

bulbo húmedo se cubre con una muselina constantemente humedecida. La evaporación de agua de la muselina requiere energía, la que es tomada del bulbo del termómetro y por tanto enfría el bulbo y desciende el valor registrado de temperatura. Cuanto más seco esté el aire, más grande es la evaporación y más grande es el descenso de temperatura. La diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y del bulbo húmedo se conoce como la depresión del bulbo húmedo y es una medida de la humedad del aire.

La temperatura del punto de rocío se mide con instrumentos especiales. El principio de funcionamiento de estos instrumentos es el de bajar la temperatura del aire hasta que ocurra la formación del rocío. La temperatura correspondiente es la temperatura del punto de rocío.

Los datos de humedad relativa y de la temperatura del punto de rocío comúnmente contienen notables errores de medición. Los errores de medición ocurren tanto en caso de uso de tipos antiguos de termohigrógrafos como en caso de instrumentos electrónicos más modernos. Se debe tener mucho cuidado en la determinación de la exactitud y la integridad de los datos de HR y del punto de rocío. Se aconseja que se compare siempre las temperaturas registradas del punto de rocío y la temperatura mínima del aire, según lo descrito en la parte final de este capítulo. Con frecuencia, es mejor utilizar temperaturas de punto de rocío que hayan sido derivadas de la temperatura mínima diaria del aire, que utilizar medidas no confiables de humedad relativa.

7.4.6.6 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

- **Presión media de vapor de la saturación (e_s)**

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$\mathrm{e°(T)} = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right]$$

Donde:

e°(T): Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa].
T: Temperatura del aire [°C].

Debido a la característica no-linear de esta ecuación, la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período:

$$e_s = \frac{\mathrm{e°(Tmax)} + \mathrm{e°(Tmin)}}{2}$$

El uso de la temperatura media del aire en lugar de las temperaturas mínima y máxima da lugar a subestimaciones de la presión media de saturación de vapor. El correspondiente déficit de presión de vapor (un parámetro que expresa la energía evaporante de la atmósfera) también será menor y el resultado será una cierta

subestimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia. Por lo tanto, es siempre recomendable el calcular la presión media de saturación de vapor como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima del aire.

- **Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)**

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, Δ. La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por:

$$\Delta = \frac{4098*\left[0{,}6108*exp\left(\frac{17{,}27*T}{T+237{,}3}\right)\right]}{(T+237{,}3)^2}$$

Donde:

Δ: Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa °C-1].

T: Temperatura del aire [°C].

- **Presión real vapor (e_a) derivada de la temperatura del punto de rocío**

Como la temperatura del punto de rocío es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarlo, la presión real de vapor (e_a) es la presión de saturación de vapor a la temperatura del punto de rocío (Trocío) [°C]:

$$e_a = \mathrm{e}°(T_{rocío}) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T_{rocío}}{T_{rocío} + 237{,}3}\right]$$

- **Presión real de vapor (ea) derivada de datos psicrométricos**

La presión real de vapor puede determinarse de la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo conocida como la depresión del bulbo húmedo. La relación se expresa por la siguiente ecuación:

$$e_a = \mathrm{e}°(T_{húmedo}) - \gamma_{psi}(T_{seco} - T_{húmedo})$$

Donde:

e_a : Presión real de vapor [kPa].

$\mathrm{e}°(T_{húmedo})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura del bulbo húmedo [kPa].

γ_{psi} : Constante psicrométrica [kPa °C-1].

$T_{seco} - T_{húmedo}$: Depresión del bulbo húmedo, con T_{seco} la temperatura del termómetro de bulbo seco y $T_{húmedo}$ la temperatura del termómetro de bulbo húmedo [°C].

La constante psicrométrica del instrumento está dada por:

$$\gamma_{psi} = a_{psi} * P$$

Donde a_{psi} es un coeficiente que depende del tipo de ventilación del bulbo húmedo [°C-1], y P es la presión atmosférica [kPa]. El coeficiente a_{psi} depende principalmente del diseño del psicrómetro y de la ventilación alrededor del bulbo húmedo.

- **Presión real de vapor (e_a) derivada de datos de humedad relativa**

La presión real de vapor se puede también derivar de la humedad relativa. Dependiendo de la disponibilidad de datos de humedad, se pueden utilizar diversas ecuaciones.

- Disponibilidad de HRmax y HRmin:

$$e_a = \frac{\mathrm{e°(Tmin)}\frac{HR_{max}}{100} + \mathrm{e°(Tmax)}\frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

Donde:

e_a : Presión real de vapor [kPa].
e°(Tmin) : Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria [kPa].
e°(Tmax): Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria [kPa].
HR_{max} : Humedad relativa máxima [%].
HR_{min} : Humedad relativa mínima [%].

Para períodos de una semana, diez días o un mes, la HR_{max} y la HR_{min} se obtienen dividiendo la suma de los valores diarios por el número de días del período considerado.

- Datos disponibles de HR_{max}:

Cuando se utiliza instrumentos con los que los errores en la estimación de HR_{min} pueden ser grandes, o cuando la exactitud de los datos es dudosa, se debe utilizar solamente HR_{max}:

$$e_a = \mathrm{e°(Tmin)}\frac{HR_{max}}{100}$$

- Datos disponibles deHR_{media}:

Cuando no se cuenta con datos disponibles de HR_{min} y HR_{max}, se puede utilizar la Siguiente ecuación, sin embargo, esta ecuación es menos precisa que las anteriores.

$$e_a = \mathrm{e}^{\circ}(T_{media})\frac{HR_{media}}{100}$$

Donde HR_{media} es la humedad relativa media, definida como el promedio entre la HR_{max} y HR_{min}.

- **Déficit de presión de vapor (e_s - e_a)**

El déficit de presión de vapor es la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a) durante un determinado período.

CAPÍTULO 8

DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

ÍNDICE

Metodología **99**
Métodos directos **100**
Métodos indirectos **105**
Métodos meteorológicos **112**

8. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

8.1 METODOLOGÍA

Los métodos para la estimación de la evapotranspiración se clasifican en:

Métodos directos. Proporcionan valores muy apegados a la realidad. Sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos.

- ✓ Evapotranspirómetros.
- ✓ Lisímetros.
- ✓ Parcelas y cuencas experimentales.
- ✓ Perfiles de humedad del suelo.
- ✓ Atmómetro de Livingstone.
- ✓ Método gravimétrico.

Métodos indirectos. Métodos basados en física teórica del microclima (métodos micro meteorológicos). Estiman la evapotranspiración en cortos intervalos de tiempo (inferiores a 30 minutos), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real.

- ✓ Balance de energía.
- ✓ Perfiles de humedad y velocidad del viento.
- ✓ Flujo turbulento de humedad.
- ✓ Fórmulas semiempíricas: fórmula de Penman.
- ✓ método de transferencia de masa.
- ✓ Métodos aerodinámicos basados en el transporte de masa (método Thornthwaite-Holzman).
- ✓ Métodos aerodinámicos.
- ✓ Métodos mixtos: consideran el balance de energía y el comportamiento aerodinámico (método de Penman, Van Bavel).
- ✓ Métodos mixtos que involucran la resistencia de la planta al transporte de vapor de agua (método de Penman-Monteith).

Métodos meteorológicos. Estiman la evapotranspiración a partir de fórmulas empíricas:

- ✓ Correlación entre medidas de evaporación en estanques.
- ✓ Método de Turc.
- ✓ Método de Coutagne.
- ✓ Método de Thornthwaite.
- ✓ Método de Hargreaves.
- ✓ Método de Hargreaves simplificado.
- ✓ Método de Makkink.
- ✓ Método de Blaney-Criddle.

- ✓ Método de Papadakis.
- ✓ Método de Ivanov.
- ✓ Método de Haude.
- ✓ Método de Jensen-Haise.
- ✓ Método de Pennan.

Determinación de la evapotranspiración real por satélite

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos.

8.1.1 MÉTODOS DIRECTOS

Miden directamente los consumos por evaporación y requieren para su determinación la instalación de aparatos, el cuidado de ellos y el seguimiento de una metodología específica en cada paso. Se aplican en zonas donde existe una agricultura establecida, ya que proporcionan valores mucho más reales y sirven a la vez para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Entre los métodos más usados destacan evapotranspirómetro, el lisímetro, los atmómetros y el método gravimétrico.

- **Evapotranspirómetros**

El evapotranspirómetro está diseñado para obtener medidas directas de evapotranspiración potencial a partir de la ecuación del balance hídrico. Consiste en uno o más depósitos excavados en el terreno y rellenos con el producto de la excavación, o con el perfil que se quiera estudiar. En la superficie se planta un césped vegetal continuo. El fondo tiene un tubo colector que recoge las salidas (G) y las conduce a un depósito colector también enterrado y situado a nivel inferior, para medirlas.

Fig. 31. Evapotranspirómetro.

Las aportaciones, procedentes de la precipitación, A_1, se miden con un pluviómetro, y las aportaciones artificiales (riego), A_2, se miden previamente, de modo que se conozca el término $A = A_1 + A_2$.

Además, se procura mantener la humedad del suelo de forma permanente en su capacidad de campo. Es decir, $\Delta R = 0$, quedando la ecuación:

$$ET = A - G \text{ (siendo A y G conocidas)}$$

El intervalo de medida, generalmente es de un día. Las condiciones de ubicación son similares a las exigidas para una estación climatológica. Además, el terreno circundante no debe diferir del situado en el interior, para que las medidas sean representativas de la zona.

En regiones húmedas, el mantenimiento a nivel de capacidad de campo de la humedad del suelo no difiere demasiado de lo que ocurre alrededor, para intervalos no muy cortos, pero en zonas áridas existe el problema de advención de calor desde zonas adyacentes (efecto oasis) y los valores obtenidos para la evapotranspiración potencial son más altos de lo que cabría esperar. Una forma de evitar el efecto oasis es crear un área de amortiguamiento rodeando el evapotranspirómetro, pero las dimensiones requeridas son en muchas ocasiones prohibitivas. Otras veces se han aplicado coeficientes reductores, pero su validez es solo a nivel local.

Los tipos de evapotranspirómetros están descritos en el capítulo 7.1.

- **Lisímetros**

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada.

Consiste en un recipiente de lámina galvanizada formado por un tanque cilíndrico de más o menos 6 metros de diámetro por 95 cm de alto, en el que se coloca el suelo y el cultivo en estudio.

El consumo de agua por evapotranspiración se determina pesando diariamente el conjunto del suelo, plantas, agua y aparato, y por diferencia de pesadas se obtiene la humedad consumida. La reposición de agua se efectúa por medio de tanques de alimentación en forma automática.

Presenta la ventaja de la facilidad de las mediciones y de la aplicación del agua. No obstante, son unos aparatos caros. Además, pueden alterar las condiciones normales del suelo afectando la medición, provocando un desarrollo anormal de las raíces que se concentran hacia el tubo de aplicación del agua, por haber más humedad en el fondo o base del recipiente y no se pueden aplicar a plantas que tengan un sistema radicular mayor que las dimensiones del tanque que contiene el suelo.

Las condiciones medidas corresponden a evapotranspiración real.

Fig. 32. Lisímetro.

Fig. 33. Lisímetros de drenaje.

En la determinación de la evapotranspiración mediante lisímetros se mantiene en juego ΔR. Para determinar ΔR se utilizan dos sistemas:

- Toma de muestras a distintos niveles en el lisímetro y determinación de su humedad.
- Situar el lisímetro sobre una gran báscula de sensibilidad adecuada y deducir de la diferencia entre dos pesadas sucesivas el ΔR. En este caso es corriente realizar, de vez en cuando, comprobaciones por el método anterior. Estos lisímetros de báscula permiten determinaciones de evapotranspiración real en intervalos muy cortos de tiempo (una hora o menos), pero su manejo es delicado y la instalación costosa.

Conocido ΔR y determinados A y G, la ecuación ET = A - G -ΔR da el valor de evapotranspiración.

Las condiciones de instalación son las mismas que para los evaporímetros.

Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ETc y Kc.

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos.

Lisímetros y evaporímetros son los únicos aparados usados, de modo general, para contrastar fórmulas empíricas.

El origen de los lisímetros se remonta al siglo XVII (1688) en Francia para medidas de infiltración. Actualmente existen variados modelos.

- **Parcelas y cuencas experimentales**

Con parcelas y cuencas experimentales se conservan las condiciones naturales y se evitan algunos de los efectos comentados en evaporímetros y lisímetros.

Las parcelas experimentales tienen una superficie de algunos centenares de m^2 y en ellas se aplica la ecuación $ET = A - G - \Delta R$. Las aportaciones (A) se miden como en el caso de los evaporímetros, e ΔR se puede determinar mediante tomas sistemáticas de muestras. G se deduce de las variaciones de niveles en sondeos situados en la parcela. Las dimensiones de la parcela no permiten suponer con garantía que la escorrentía superficial es nula y por tanto se debe medir. Para ello se construyen zanjas colectoras siguiendo las curvas de nivel de menor cota.

Los mayores errores derivan del agua que escapa subterráneamente a través de los límites de la parcela. Si el substrato impermeable no es demasiado profundo puede evitarse construyendo pantallas verticales de hormigón que lleguen a él y así convertir la parcela en un monumental lisímetro con el terreno interior en condiciones naturales.

En las cuencas experimentales, con áreas de hasta 5-10 km^2 y límites superficiales y subterráneos bien definidos, se procede de forma análoga a la determinación de G. En la determinación de G tiene mayor importancia medir la escorrentía superficial con una estación de aforos en la sección transversal inferior, del cauce drenante. Al aumentar el área de la cuenca decrece la aproximación de la estimación.

- **Perfiles de humedad del suelo**

Este método parte de la hipótesis de que en el intervalo de medida no hay aportaciones ni pérdidas de agua en la zona de estudio. Por tanto en la ecuación $ET = A - G - \Delta R$, $A = 0$ y $G = 0$ quedando reducida a $ET = -\Delta R$ (ΔR será negativo) y determinándose valores de evapotranspiración real.

Se toman muestras del suelo a distintos niveles de una misma vertical en los instantes t_1 y t_2. Los perfiles de humedad obtenidos por cualquiera de los métodos de determinación humedad en el suelo dan valores de R_1 y R_2, respectivamente, de manera que: $ET = R_1 - R_2$.

El método que en teoría es válido, tiene serias dificultades para su aplicación práctica y los valores obtenidos pueden estar muy alterados, especialmente por aportaciones laterales de agua, o en general, aportaciones de agua exteriores a la zona radicular estudiada. A su vez, el uso de coeficientes correctores, no es efectivo por los cambios en calidad y cantidad de agua aplicada artificialmente al terreno antes e proceder a las medidas y por el crecimiento de las raíces durante el período vegetativo. Los valores de

evapotranspiración obtenidos están muy vinculados al tipo de suelo y tendrán sólo validez local.

- **Atmómetro de Livingstone**

Atmómetro, es el termino general empleado para designar cualquier aparato para medir evaporación.

Fig. 34. Atmómetro de Livingstone.

El atmómetro de Livingstone, está formado por una esfera de cerámica porosa, que tiene un vástago barnizado del mismo material que se introduce dentro de un recipiente graduado que contiene agua. La esfera se encuentra pintada de blanco o de negro. Al recibir la energía de la atmósfera, se produce una evaporación en la superficie de la esfera que se traduce en una succión en el depósito graduado, el cual mide la cantidad de agua evaporada.

Se ha comprobado que existe una mayor correlación entre la evapotranspiración y las lecturas de los atmómetros, si se utilizan dos, uno negro y otro blanco. El valor de la evapotranspiración se obtiene con la diferencia de lecturas.

- **Método gravimétrico**

Se basa en la determinación en los diferentes valores de humedad registrados en una serie de pesadas que se efectúan a través del ciclo vegetativo, en muestras de suelo, obtenidas a una profundidad igual a la que tienen las raíces de las plantas del cultivo considerado.

En función de estas diferencias y de las características del suelo se obtienen las láminas de agua consumidas por evaporación, en un periodo de tiempo determinado.

La suma total de las láminas consumidas en los intervalos entre riegos, es igual a la "lámina total consumida" o "uso consuntivo" del cultivo estudiado.

Las medidas directas presentan una serie de problemas como que solo funcionan en épocas en que los flujos sobrepasan un umbral impuesto por la resolución instrumental, por tanto, fallan cuando las concentraciones de agua son bajas, requieren recalibraciones periódicas, no son válidos cuando hay lluvia, requieren una longitud rodal suficiente para ser aplicados, lo que hace que los datos necesiten ser filtrados considerando orientaciones de viento concretas. Son útiles para validar modelos, pero esto solo se puede realizar en periodos en los que funcionen adecuadamente.

8.1.2 MÉTODOS INDIRECTOS

- **Métodos de balance de energía y microclimáticos**

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.

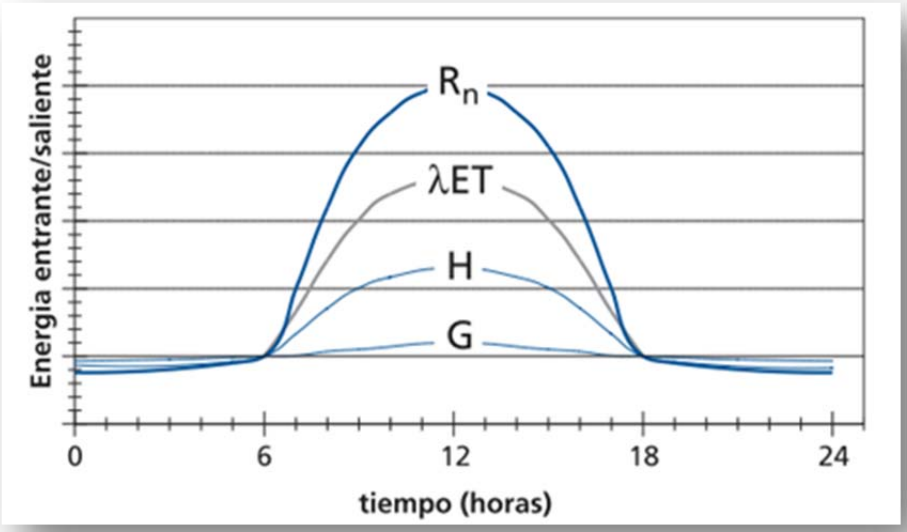


Fig. 35. Representación esquemática de la variación diurna de los componentes del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado.

En este método, se considera el balance total de energía correspondiente a un elemento de volumen con base a la superficie, que contiene cobertura vegetal y la atmósfera circundante. Una parte de la energía que recibe se empleará en producir evapotranspiración y es la que interesa evaluar, traduciendo el resultado a unidades de agua evaporada.

La ecuación del balance de energía, de forma simplificada sería:

$$R_N = C_a + C_s + C_L$$

Siendo:

R_N = el flujo de radiación neta.
C_a = el flujo de calor almacenado en el suelo.
C_s = el flujo de calor sensible. El calor sensible, representa tanto el calor que es emitido desde las superficies al aire por conducción o por convección (H), como el calor que pasa por conducción al suelo (G).
C_L = el flujo de calor latente.

Todos los términos deben estar medidos en las mismas unidades, como por ejemplo cal/cm^2.min; cal/cm^2, día, etc.

Desde el punto de vista energético la evapotranspiración, representada por el símbolo, λ ET, puede describirse por un balance de energía:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

Donde R_n es la radiación neta, H es el calor sensible, G es el flujo de calor del suelo, y λET es el flujo de calor latente. Los distintos términos pueden ser positivos o negativos.

Cuando Rn es positivo, proporciona energía a la superficie y cuando G, λET y H son positivos retiran energía de la superficie (Figura 35).

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

Si en esta ecuación se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por lo tanto la ecuación se aplica solamente a superficies grandes y extensas de vegetación homogénea. La ecuación está restringida a cuatro componentes: Rn, λET, H y G. No se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas. Estos términos solo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar diaria y pueden ser considerados despreciables cuando se comparan con los otros cuatro componentes.

El flujo de calor latente (λET) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (Rn) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible (H) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de H incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

Los términos R_N y C_a se pueden medir con bastante aproximación directamente con el radiómetro de radiación neta, sistema de termopares de láminas ennegrecidas que reciben en una y otra cara la radiación global incidente (R_i) y la radiación global reflejada (R_r) y miden la diferencia (R_N).

Fig. 36. Medidores de radiación global y neta.

Fig. 37. Cúpula de silicona de un radiómetro de radiación neta.

- **Perfiles de humedad y velocidad del viento**

La aplicación de este método consiste en obtener unos valores de la evapotranspiración a partir de las medidas de los gradientes de humedad y velocidad del viento. Puede aplicarse este método para intervalos de tiempos cortos.

- **Flujo turbulento de humedad**

Se obtiene unos valores aplicando unas fórmulas con las medidas realizadas en intervalos pequeños de tiempo del flujo de vapor y del calor sensible que discurre por él.

- **Métodos semi-empíricos. Fórmula de Penman.**

Constituye uno de los métodos clasificados como "semi-empíricos" porque mezclan varios conceptos con el fin de evitar medidas más difíciles de obtener.

El método de Penman es semiempírico porque parte de la ecuación de la fórrmula de Penman para estimar la evaporación y los valores de evaporación en superficie de agua libre, se multiplican por un coeficiente reductor empírico para obtener evapotranspiración potencial (Tabla 15).

mes	coeficiente reductor (f)
Enero	0,6
Febrero	0,6
Marzo	0,7
Abril	0,7
Mayo	0,8
Junio	0,8
Julio	0,8
Agosto	0,8
Septiembre	0,7
Octubre	0,7
Noviembre	0,6
Diciembre	0,6

Tabla 15. Coeficiente reductor (f) para aplicar la fórmula de Pennan para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Si en la fórmula

$$R_n = R_i(1-r) -= R_i(1-r) - 1440 * \sigma * {T_a}^4(0{,}56 - 0{,}092 * \sqrt{e_d} * (1 - 0{,}09\, m)$$

Se da al albedo el valor correspondiente a la superficie evaporante no es preciso el factor reductor, pero para ello esta superficie debe ser totalmente homogénea.

Valores de Albedo (r) para distintas superficies evaporantes	
Superficie evaporante	Albedo (r)
Agua libre a temperatura <30ºC	0,02-0,06
Agua libre a temperatura <30ºC	0,06-0,40
Arcillas húmedas	0,02-0,08
Arcillas secas	0,16
Arenas claras	0,34-0,40
Arenas oscuras	0,35
Arenas ribereñas	0,43
Bosques de pináceas	0,1-0,14
Bosques de frondosos	0,18
Cereales	0,10-0,25
Césped verde	0,26
Césped seco	0,19
Hielo	0,36-0,50
Lechugas	0,22
Nieve	0,40-0,90
Patatas	0,19
Rocas	0,12-0,15
Zonas urbanizadas	0,15-0,25

Tabla 16. Valores de albedo para distintas superficies evaporantes.

En la práctica, conviene escribir la ecuación así:

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} R_N + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

Los datos necesarios para la aplicación de la fórmula anterior se obtienen en las estaciones climatológicas completas y son según Tabla 17:

Datos	Símbolo	Unidad
Latitud	λ	grado
Horas de insolación		sexagesimal
Temperatura	n	hora
Velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie evaporante	v_2	m/seg
Humedad relativa	Hg	% (adimensional)

Tabla 17. Datos meteorológicos de una estación meteorológica. Los datos meteorológicos son medidas diarias.

El cálculo puede realizarse de los siguientes modos:

Δ/γ para la temperatura T.

Siendo:

Δ la pendiente de la curva de tensión saturante a la temperatura t - γ la constante psicrométrica.

$R_n = R_N/c_1$.

Si para el cálculo de Rn se ha utilizado el albedo correspondiente a una superficie de agua libre (r=0,05 según los valores de albedo), la evapotranspiración potencial mensual será:

$$ETP = f.d.E$$

Siendo:

f = coeficiente reductor correspondiente al mes (Tabla 15).

d = número de días del mes.

E = evaporación en superficie de agua libre (en mm/día).

t	Δ/γ	t	Δ/γ
0,0	0,67	15,5	1,68
0,5	0,69	16,0	1,73
1,0	0,72	16,5	1,78
1,5	0,74	17,0	1,82
2,0	0,76	17,5	1,88
2,5	0,79	18,0	1,93
3,0	0,81	18,5	1,98
3,5	0,84	19,0	2,03
4,0	0,86	19,5	2,09
4,5	0,89	20,0	2,14
5,0	0,92	20,5	2,20
5,5	0,94	21,0	2,26
6,0	0,97	21,5	2,32
6,5	1,00	22,0	2,38
7,0	1,03	22,5	2,45
7,5	1,06	23,0	2,51
8,0	1,10	23,5	2,58
8,5	1,13	24,0	2,64
9,0	1,16	24,5	2,71
9,5	1,20	25,0	2,78
10,0	1,23	25,5	2,85
10,5	1,27	26,0	2,92
11,0	1,30	26,5	3,00
11,5	1,34	27,0	3,08
12,0	1,38	27,5	3,15
12,5	1,42	28,0	3,23
13,0	1,46	28,5	3,31
13,5	1,50	29,0	3,40
14,0	1,55	29,5	3,48
14,5	1,59	30,0	3,57
15,0	1,64	32	3,6

Tabla 18. Relación Δ/γ en función de la temperatura del aire (t).

- **Método de transferencia de masa**

Este enfoque considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire (remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas, utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie. Por lo tanto su aplicación se restringe principalmente, a situaciones de investigación.

- **Balance de agua en el suelo**

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 38). El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular.

Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS).

Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R+P-ES-D+C\mp\Delta FS\mp\Delta SW$$

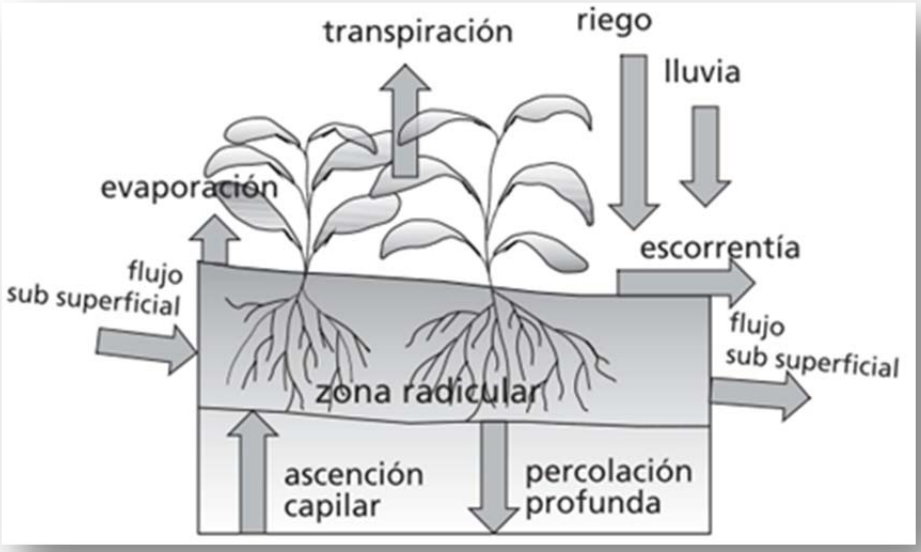


Fig. 38. Balance de agua en el suelo de la zona radicular.

Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días.

8.1.3 MÉTODOS METEOROLÓGICOS

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente.

Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiration de referencia, ETo. La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (Kc) que relacionan la ETc con la ETo. La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (Ks) o modificando el coeficiente de cultivo.

- **Correlación entre medidas de evaporación en estanques evaporímetros y evapotranspiración**

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo.

Han sido muy frecuentes los intentos de correlacionar medidas de evaporación (E) en estanques evaporimétricos (evaporación del tanque tipo "A") y evapotranspiración con medidas de evapotranspiración (ET) en lisímetros. En muchos casos se ha obtenido una estrecha correlación entre ambas medidas, variando el cociente ET/E entre 0,75 y 1,05 pro los resultados obtenidos están muy ligados a los tipos de estanque evaporimétrico y lisímetro utilizados, a las condiciones ambientales de su ubicación y a la época del año. Respecto a ésta, las mayores divergencias tienen lugar en los meses secos y ventosos, en los que la advención lateral del calor es importante. Debido a estas divergencias Pruitt (1966) ha intentado introducir el factor viento en la correlación entre el cociente ET/E y el término aerodinámico de la fórmula de Penman, deduciéndose una ecuación de tipo ET = f(E). En condiciones de fuerte advención, el ajuste no es demasiado bueno, por lo que debe incluirse también el término energético de la fórmula de Penman.

Y la serie de métodos empíricos que analizaremos en el siguiente apartado, como los métodos que han sido implementados en la Herramienta de Cálculo objeto de este proyecto.

- Fórmula de Thornthwaite.
- Fórmula de Blaney-Criddle.
- Fórmula de Makkink.
- Fórmula de Turc.
- Fórmula de Coutagne.
- Método de Penman.
- Método de Penman-Monteith.
- Curva de Hansen.
- Método de Jensen-Haise.
- Fórmula de Ivánov.
- Fórmula de Papadakis.

CAPÍTULO 9

METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

ÍNDICE

Obtención de datos **115**
Métodos meteorológicos aplicados **117**
Cálculo del caudal medio anual **132**

9. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

En este capítulo se van a desarrollar los puntos prácticos para la obtención de nuestro caudal, dichos puntos serán los puntos principales de estudio de este proyecto, la obtención de datos y el cálculo de la evapotranspiración que es el punto más singular de este proyecto ya que es el que lo diferencia de la obtención del caudal en tramos aforados y por último la obtención del caudal medio anual que vamos buscando.

9.1 DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO

Los datos previos que tenemos que tener o localizar para el desempeño de la hoja de cálculo y obtención de todos los métodos para el cálculo del caudal son:

- Para los métodos de Turc y Coutagne:
  - ✓ Temperatura media anual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Hargreaves:
  - ✓ Radiación solar extraterrestre.
  - ✓ Temperatura máxima diaria.
  - ✓ Temperatura mínima diaria.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Hargreaves simplificado:
  - ✓ Radiación solar extraterrestre.
  - ✓ Temperatura máxima diaria.
  - ✓ Temperatura mínima diaria.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Blaney-Criddle:
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Porcentaje horas de sol según latitud.
  - ✓ Valores mensuales de kg, coeficiente global de desarrollo del cultivo de referencia.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.
  - ✓ Precipitación anual

- Para el método de Thornthwaite:
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Número máximo de horas de sol.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Ivanov:
  - ✓ Humedad media del aire.
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Haude:
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Temperatura mínima mensual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Papadakis:
  - ✓ Temperatura máxima mensual.
  - ✓ Temperatura mínima mensual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Jensen-Haise:
  - ✓ Radiación solar extraterrestre.
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Makkink:
  - ✓ Radiación solar extraterrestre.
  - ✓ Temperatura media diaria.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

- Para el método de Pennan:
  - ✓ Radiación solar extraterrestre.
  - ✓ Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.
  - ✓ Temperatura media mensual.
  - ✓ Precipitación anual.
  - ✓ Superficie de la cuenca de captación.

En el siguiente epígrafe se indican los sistemas de información geográfica empleados (SIG) para la recopilación de los datos citados.

9.1.1 RECOPILACIÓN DE DATOS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TABLAS

Los datos de temperatura media anual, temperatura media diaria, temperatura media mensual, temperatura máxima media, temperatura mínima media y radiación solar extraterrestre se obtienen en el SIG "Radiación Solar en Andalucía".

La radiación extraterrestre también se obtiene a través de la tabla ´´Radiación extraterrestre para el hemisferio Norte expresada en evaporación equivalente (mm/día) (Doorenbos y Pruit, 1977)``.

El número máximo de horas de sol se encuentra tabulado según la latitud en el libro "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements", de Allen, R.G. (1.998). La tabla se adjunta en el apartado de ´´ANEXOS`` del capítulo de ´´DESARROLLO EN EXCEL DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO.

Porcentaje horas de sol según latitud, se muestra la tabla en el método de Blaney-Criddle, apartado 9.2.7.

Valores mensuales de kg, coeficiente global de desarrollo del cultivo de referencia, se obtiene de la tabla de coeficientes mostrada en el método de Blaney-Criddle, apartado 9.2.7.

La humedad media del aire y velocidad del viento, se pueden encontrar datos inclusive a tiempo real en la página web de la agencia estatal de meteorología (AEMET). También hay un SIG de humedad de la Junta de Andalucía.

La precipitación anual en la cuenca de captación de estudio se obtiene en el SIG "S.A.I.H. del Guadalquivir".

La superficie de la cuenca de captación se traza y se mide en el SIG "REDIAM".

A continuación se describen brevemente los SIG utilizados, así como la operación en ellos para la obtención de los datos necesarios.

9.2 MÉTODOS METEOROLÓGICOS APLICADOS

9.2.1 MÉTODO DE TURC

Turc, en 1954, propuso un método empírico sencillo, basado en la temperatura y la precipitación. Al igual que otros métodos basados en la correlación entre la precipitación como única recarga y la evaporación, pueden ser muy útiles para ciertas cuencas, pero su aplicación a otras regiones o cuencas, donde la profundidad de la zona no saturada, uso del suelo, topografía, clima, y sobre todo, tipo de lluvia son diferentes al lugar para donde se han realizado estas correlaciones, su aplicación es muy discutible. Esta fórmula se recomienda en climas y zonas húmedas.

Tiene la expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año.
P = Precipitación en mm/año.
$L = 300 + 25 \cdot t + 0{,}05 \cdot t^2$
t = Temperatura media anual en ºC.

La limitación de ésta fórmula es que para P < 0.3 L, daría una ETR mayor a la precipitación.

9.2.2 MÉTODO DE COUTAGNE

La fórmula de Coutagne, al igual que la de Turc, puede ofrecer un resultado distante al real si no se aplica en la zona en que el autor de la misma la diseño, debido a que esta fórmula se implementó para climas húmedos. No da buenos resultados para regiones áridas.

Queda definida de la siguiente forma:

$$ETR = P - \chi \cdot P^2$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en metros/año.
P = Precipitación en metros/año.
$\chi = \frac{1}{0{,}8 + 0{,}14 \cdot t}$
t = Temperatura media anual en ºC.

La fórmula sólo es válida para valores de la precipitación comprendidos entre $1/8\chi$ y $1/2\chi$.

9.2.3 MÉTODO DE THORNTHWAITE

Se trata de una fórmula que requiere un procedimiento más tedioso y datos más específicos pero ofrece mejores resultados sea cual sea la zona climática de aplicación de la misma.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1º. Se calcula un "índice de calor mensual" *(i)* a partir de la temperatura media mensual *(t)*.

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1{,}514}$$

2º. Se calcula el "índice de calor anual" *(I)* sumando los 12 valores de *i*.

$$I = \sum i$$

3º. Se calcula la ETP mensual "sin corregir" mediante la fórmula:

$$ETP_{Sin\ Corregir} = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I}\right)^{a}$$

Donde:

$ETP_{Sin\ Corregir}$ = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).
t = Temperatura media mensual en ºC.
I = Índice de calor anual.
$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0{,}49239$.

4º. Corrección para el número de días del mes y el número de horas de sol:

$$ETP = ETP_{SC} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial corregida.
N = Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud.
d = Número de días del mes.

La principal ventaja es que usa datos climatológicos accesibles. Da buenos resultados en zonas húmedas y con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas.

Entre las críticas que pueden hacerse a éste método están:

- La temperatura no es un buen indicador de la energía disponible para la evapotranspiración.
- La temperatura del aire respecto a la temperatura de radiación puede ser diferente.
- La evaporación puede cesar cuando la temperatura promedio desciende de cero grados centígrados, lo cual es falso.
- El viento puede ser un factor importante en algunas áreas requiriéndose en ocasiones para ello, un factor de corrección.
- La fórmula no toma en cuenta el efecto de calentamiento o enfriamiento del aire por advección.

9.2.4 MÉTODO DE HARGREAVES

La fórmula de Hargreaves necesita para evaluar la Evapotranspiración Potencial solamente datos de Temperaturas y de Radiación Solar.

La expresión general es la siguiente:

$$ET0 = 0{,}0135 \cdot (t_{med} + 17{,}78) \cdot Rs$$

Donde:

ET0 = Evapotranspiración potencial diaria, en mm/día.
t_{med} = Temperatura media en ºC.
Rs = Radiación solar incidente, convertida en mm/día.

La radiación solar incidente, Rs, se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera esta).

9.2.5 MÉTODO DE HARGREAVES SIMPLIFICADO

Sustituyendo el valor de Rs en la expresión inicial, y tomando para el coeficiente KT el valor medio de 0.17, resulta la siguiente expresión simplificada.

$$ETO = 0{,}0023 \cdot (t_{med} + 17{,}78) \cdot R_0 \cdot \sqrt{(t_{máx} - t_{mín})}$$

Donde:

ET0 = Evaporación Potencial diaria, en milímetros/día.
t_{med} = Temperatura media diaria, en ºC.
R_0 = Radiación solar extraterrestre en milímetros/día.
$t_{máx}$ = Temperatura diaria máxima.
$t_{mín}$ = Temperatura diaria mínima.

9.2.6 MÉTODO DE MAKKINK

Makkink usando como base sus experiencias en Holanda, deja demostrado que da buenos resultados en climas húmedos y fríos pero no en regiones áridas, propone la fórmula siguiente:

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial (mm/día).
Δ = pendiente de la curva de saturación para la temperatura media diaria del aire.
γ = constante psicrométrica.

La expresión:

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

Está tabulada, para distintas temperaturas, en la siguiente tabla:

t	Δ/γ	t	Δ/γ
0,0	0,401	15,5	0,627
0,5	0,409	16,0	0,633
1,0	0,4158	16,5	0,640
1,5	0,426	17,0	0,646
2,0	0,432	17,5	0,652
2,5	0,440	18,0	0,658
3,0	0,448	18,5	0,664
3,5	0,445	19,0	0,670
4,0	0,462	19,5	0,676
4,5	0,470	20,0	0,682
5,0	0,478	20,5	0,688
5,5	0,485	21,0	0,694
6,0	0,493	21,5	0,699
6,5	0,500	22,0	0,705
7,0	0,508	22,5	0,710
7,5	0,515	23,0	0,715
8,0	0,522	23,5	0,720
8,5	0,530	24,0	0,725
9,0	0,537	24,5	0,730
9,5	0,544	25,0	0,735
10,0	0,552	25,5	0,740
10,5	0,559	26,0	0,745
11,0	0,566	26,5	0,750
11,5	0,573	27,0	0,755
12,0	0,580	27,5	0,760
12,5	0,587	28,0	0,764
13,0	0,593	28,5	0,768
13,5	0,600	29,0	0,772
14,0	0,607	29,5	0,776
14,5	0,614	30,0	0,780
15,0	0,621	30,5	0,784

Tabla 18. Relación Δ/γ en función de la temperatura del aire (t).

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\left(c1\frac{R_s}{L} + c2\right)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración makkink.
Rs = Radiación solar incidente a nivel del suelo (cal/cm2/dia ó mm/día).
C1 = Coeficiente de Makkink.
C2 = Coeficiente de Makkink.

9.2.7 MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE

En este método toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona.

El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha y, por supuesto, varía de cultivo a cultivo. En la Tabla 20 se presentan los ciclos vegetativos de algunos cultivos.

Si se desea estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se puede emplear la fórmula:

$$E_t = k_g * F$$

Donde:

E_t = evapotranspiración durante el ciclo vegetativo, cm.
F = factor de temperatura y luminosidad.
k_g = coeficiente global de desarrollo.

Da una estimación de la evapotranspiración real más que de la potencial, ya que se basa en correlaciones de prácticas de riego existentes.

El coeficiente global de desarrollo Kg varía entre 0.5 y 1.2. En la Tabla 20 se muestran algunos de los valores de Kg para diversos cultivos. El factor de temperatura y luminosidad F se calcula como:

$$F = \sum_{i=1}^{n} f_i$$

Donde n = número de meses que dura el ciclo vegetativo.

$$f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17{,}8}{21{,}8} \right)$$

Donde:

P_i = porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año (Tabla 19).
T_i = temperatura media del mes i en ^{0}C.

Cuando la zona en cuestión es árida, los valores de f_i se multiplican por un factor de corrección K_{ti} que se calcula como:

$$K_{ti} = 0.03114\, T_i + 0.2396$$

Cuando se desea determinar valores de la evapotranspiración en periodos más cortos que un ciclo vegetativo, por ejemplo, de un mes, se usa la fórmula:

$$E_{ti} = Kc_i f_i$$

Donde E_{ti} es la evapotranspiración durante el periodo i; f_i se calcula con P_i y T_i correspondientes al periodo considerado y Kc_i es un coeficiente de desarrollo parcial. Kc_i se puede determinar mediante parcelas experimentales instaladas en el sitio de interés, o bien usando los valores medios tabulados.

LATITUD NORTE	PORCENTAJE HORAS-LUZ DIA PARA CADA MES DEL AÑO											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	8,5	7,66	8,49	8,21	8,5	8,22	8,5	8,49	8,21	8,5	8,22	8,5
5	8,32	7,56	8,47	8,29	8,65	8,41	8,67	8,6	8,23	8,42	8,07	8,3
10	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,6	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,1
15	7,94	7,36	8,43	8,44	8,98	8,8	9,05	8,83	8,28	8,2	7,75	7,88
16	7,93	7,35	8,44	8,46	9,07	8,83	9,07	8,85	8,27	8,24	7,72	7,83
17	7,86	7,32	8,43	8,48	9,04	8,87	9,11	8,87	8,27	8,22	7,69	7,8
18	7,83	7,3	8,42	8,5	9,09	8,92	9,16	8,9	8,27	8,21	7,66	7,74
19	7,79	7,28	8,41	8,51	9,11	8,97	9,2	8,92	8,28	8,19	7,63	7,71
20	7,74	7,25	8,41	8,52	9,15	9	9,25	8,96	8,3	8,18	7,58	7,66
21	7,71	7,24	8,4	8,54	9,18	9,05	9,29	8,98	8,29	8,15	7,54	7,62
22	7,66	7,21	8,4	8,56	9,22	9,09	9,33	9	8,3	8,13	7,5	7,55
23	7,62	7,19	8,4	8,57	9,24	9,12	9,35	9,02	8,3	8,11	7,47	7,5
24	7,58	7,17	8,4	8,6	9,3	9,2	9,41	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
25	7,53	7,14	8,39	8,61	9,33	9,23	9,45	9,09	8,32	8,09	7,4	7,42
26	7,49	7,12	8,4	8,64	9,38	9,3	9,49	9,1	8,31	8,06	7,36	7,31
27	7,43	7,09	8,38	8,65	9,4	9,32	9,52	9,13	8,32	8,03	7,36	7,31
28	7,4	7,07	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
29	7,35	7,04	8,37	8,7	9,49	9,43	9,61	9,19	8,32	8	7,24	7,2
30	7,3	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,33	7,99	7,19	7,15
31	7,25	7	8,36	8,73	9,57	9,54	9,72	9,24	8,33	7,95	7,15	7,09
32	7,2	6,97	8,37	8,76	9,62	9,59	9,77	9,27	8,34	7,95	7,11	7,05
33	7,15	6,94	8,36	8,78	9,68	9,65	9,82	9,31	8,35	7,94	7,07	6,98
34	7,1	6,91	8,36	8,8	9,72	9,7	9,88	9,33	8,36	7,9	7,02	6,92
35	7,05	6,88	8,35	8,83	9,77	9,76	9,94	9,37	8,37	7,88	6,97	6,85
36	6,99	6,85	8,35	8,85	9,82	9,82	9,09	9,4	8,37	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66
40	6,76	6,72	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,39	7,75	6,72	7,52
42	6,63	6,65	8,31	9	10,14	10,22	10,35	9,62	8,4	7,69	6,62	6,37
44	6,49	6,58	8,3	9,06	10,26	10,38	10,49	9,7	8,41	7,63	6,49	6,21
46	6,34	6,5	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,57	6,36	6,04
48	6,17	6,41	8,27	9,18	10,53	10,71	10,8	9,89	8,44	7,51	6,23	5,86
50	5,98	6,3	8,24	9,24	10,68	19,91	10,9	10	8,46	7,45	6,1	5,65
52	5,77	6,19	8,21	9,29	10,85	11,13	11,2	10,12	8,49	7,39	5,93	5,43
54	5,55	6,08	8,18	9,36	11,03	11,38	11,43	10,26	8,51	7,3	5,74	5,18
56	5,3	5,95	8,15	9,45	11,22	11,67	11,69	10,4	8,52	7,21	5,54	4,89
58	5,01	5,81	8,12	9,55	11,46	12	11,98	10,55	8,51	7,1	4,31	4,56
60	4,67	5,65	8,08	9,65	11,74	12,39	12,31	10,7	8,51	6,98	5,04	4,22

Tabla 19. Porcentaje horas-luz día para cada mes del año.

CULTIVO	COEFICIENTE GLOBAL Kg											
olivo	0,5	0,5	0,65	0,6	0,55	0,05	0,45	0,45	0,55	0,6	0,65	0,5
aguacate	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
alfalfa	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
algodón	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
arroz	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
cacahuete	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
cacao	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
café	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
caña de azucar	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
trigo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
cítricos	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
espárrago	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
fresa	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
garbanzo	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
girasol	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
hortalizas	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
lechuga	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
maiz	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
melón	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
plátano	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
sandía	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
tomate	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Tabla 20. Coeficiente para el cultivo Kg o Kc.

9.2.8 MÉTODO DE PAPADAKIS

Es un método experimental basado en la consideración del déficit de saturación de vapor ($e^0 - e$). El método se emplea en la clasificación de Papadakis. Como quiera que para la cuantificación del déficit de saturación es necesaria la humedad relativa y las temperaturas, y, dado que el primer dato no siempre está disponible, Papadakis (1961) propuso, finalmente, la siguiente expresión para el cálculo de la ETP:

$$ETP_{PAP\,i} = 5{,}625\,[e^0(T_i) - e(t_i - 2)]$$

tensión de vapor de saturación en función de la temperatura										
	0	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
-7	3,62	3,59	3,56	3,53	3,51	3,48	3,45	3,43	3,4	3,37
-6	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,7	3,67	3,65
-5	4,22	4,19	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4	3,97	3,94
-4	4,55	4,51	4,48	4,45	4,41	4,38	4,35	4,31	4,28	4,25
-3	4,9	4,87	4,83	4,79	4,76	4,72	4,69	4,65	4,62	4,58
-2	5,28	5,24	5,2	5,17	5,13	5,09	5,05	5,01	4,98	4,94
-1	5,69	5,64	5,6	5,56	5,52	5,48	5,44	5,4	5,36	5,32
0	6,12	6,07	6,03	5,98	5,94	5,9	5,86	5,81	5,77	5,73
0	6,12	6,16	6,21	6,25	6,3	6,34	6,39	6,44	6,48	6,53
1	6,58	6,62	6,67	6,72	6,77	6,82	6,87	6,92	6,97	7,02
2	7,07	7,12	7,17	7,22	7,27	7,32	7,38	7,43	7,48	7,54
3	7,59	7,64	7,7	7,75	7,81	7,86	7,92	7,97	8,03	8,09
4	8,14	8,2	8,26	8,32	8,38	8,44	8,49	8,55	8,61	8,67
5	8,74	8,8	8,86	8,92	8,98	9,04	9,11	9,17	9,23	9,3
6	9,36	9,43	9,49	9,56	9,63	9,69	9,76	9,83	9,89	9,96
7	10,03	10,1	10,17	10,24	19,31	10,38	10,45	10,52	10,6	10,67
8	10,74	10,81	10,89	10,96	11,04	11,11	11,19	11,26	11,34	11,42
9	11,49	11,57	11,65	11,73	11,81	11,89	11,97	12,05	12,13	12,21
10	12,49	12,37	12,46	12,54	12,62	12,71	12,79	12,88	12,97	13,05
11	13,14	13,23	13,31	13,4	13,49	13,58	13,67	13,76	13,85	13,94
12	14,04	14,13	14,22	14,32	14,41	14,51	14,6	14,7	14,79	14,89
13	14,99	15,09	15,18	15,28	15,38	15,48	15,59	15,69	15,79	15,89
14	15,99	16,1	16,2	16,31	16,41	16,52	16,63	16,73	16,84	16,95
15	17,06	17,17	17,28	17,39	17,5	17,62	17,73	17,84	17,96	18,07
16	18,19	18,31	18,42	18,54	18,66	18,78	18,9	19,02	19,14	19,26
17	19,38	19,5	19,63	19,75	19,88	20	20,13	20,26	20,38	20,51
18	20,64	20,77	20,9	31,03	21,17	21,3	21,43	21,57	21,7	21,84
19	21,97	22,11	22,25	22,39	22,53	22,67	22,81	22,95	23,09	23,24
20	23,38	23,53	23,67	23,82	23,97	24,11	24,26	24,41	24,56	24,71
21	24,87	25,02	25,17	25,33	25,48	25,64	28,8	25,95	26,11	26,27
22	26,43	26,59	26,76	26,92	27,08	27,25	27,41	27,58	27,75	27,92
23	28,09	28,26	28,43	28,6	28,77	28,95	29,12	29,3	29,47	29,65
24	29,83	30,01	30,19	30,37	30,55	30,73	30,92	31,1	31,29	31,48
25	31,66	31,85	32,04	32,23	32,43	32,62	32,81	33,01	33,2	33,4
26	33,6	33,8	34	34,2	34,4	34,6	34,81	35,01	35,22	35,43
27	35,64	35,85	36,06	36,27	36,48	36,7	36,91	37,13	37,34	37,56

28	37,78	38	38,22	38,45	38,67	38,9	39,12	39,35	39,58	39,81
29	40,04	40,27	40,5	40,74	40,97	41,21	41,45	41,69	41,93	42,17
30	42,41	42,66	42,9	43,15	43,4	43,65	43,9	44,15	44,4	44,65
31	44,91	45,17	45,42	45,68	45,94	46,2	46,47	46,73	47	47,26
32	47,53	47,8	48,07	48,35	48,62	48,89	49,17	49,45	49,73	50,01
33	50,29	50,57	50,86	51,14	51,43	51,72	52,01	52,3	52,6	52,89
34	53,19	53,48	53,78	54,08	54,39	54,69	54,99	55,3	55,61	55,92
35	56,23	56,54	56,85	57,17	57,49	57,81	58,13	58,45	58,77	59,09
36	59,42	49,75	60,08	60,41	60,74	61,08	61,41	61,75	62,09	62,43
37	62,77	63,12	63,46	63,81	64,16	64,51	64,86	65,21	65,57	65,93
38	66,29	66,65	67,01	67,37	67,74	68,11	68,48	68,85	69,22	69,59
39	29,97	70,35	70,73	71,11	71,49	71,88	72,27	72,66	73,05	73,44
40	73,83	74,23	74,63	75,03	75,43	75,84	76,24	76,65	77,06	77,47
41	77,88	78,3	78,72	79,14	79,56	79,98	80,4	80,83	81,26	81,69

Tabla 21. Tensión de vapor de saturación en función de la temperatura.

$e^0(T_i)$: Tensión de saturación de vapor para la temperatura media de las máximas del mes considerado (mb).

$e^0(t_i - 2)$: Tensión de saturación de vapor para la temperatura media de mínimas menos 2 ^{0}C (mb).

La tensión de vapor de saturación e^0 se puede calcular mediante la fórmula de Bossen, en función de la temperatura media (tm) en ^{0}C.

$$e^0(mb \text{ ó } hPa) = 33{,}8639[(0{,}00738 \text{ tm} + 0{,}8072)^8 - 0{,}000019(1{,}8\, tm + 48) + 0{,}001316]$$

También se puede emplear la Tabla 21: ´´tensión de vapor de saturación e^0 en función de la temperatura``. Directamente jugando con la temperatura se obtiene el valor de e^0 en mb ó hPa.

9.2.9 MÉTODO DE IVANOV

Esta ecuación fue propuesta en 1954, y utiliza la temperatura y la humedad relativa media del periodo al que se aplica. Ivanov surge como una modificación al método de Turc para implementar el método también para temperaturas positivas. Y se presentan dos fórmulas una para el cálculo mensual y otra para el cálculo diario.

Para el cálculo diario de ETP:

$$\text{ETP} = 0{,}000036\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración Ivanov $[mm\ dia]^{-1}$.
T = La temperatura media del aire para el intervalo de tiempo dado [^{0}C].
RH = Humedad media del aire [%].

Para el cálculo mensual de ETP, el cual ha sido el seleccionado en nuestra herramienta, para la facilidad del usuario de introducir menos datos.

$$\text{ETP} = 0{,}0011\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración Ivanov $[mm\ mes]^{-1}$.
T = La temperatura media del aire para el intervalo de tiempo dado [^{0}C].
RH = Humedad media del aire [%].

9.2.10 MÉTODO DE HAUDE

Haude desarrolló un método para estimar la evapotranspiración sobre la base del enfoque de Dalton, por sumas mensuales.

Para los valores de evapotranspiración diaria el enfoque de Haude puede ser inexacto. Se recomienda utilizarlo para la estimación de sumas o promedios mensuales.

$$ETP = f(e_s(T) - e)_{14} \leq 7\ mm/d$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración Haude $[mm\ dia]^{-1}$.
F = Factor de Haude para los meses individuales $[\text{mm hPa}]^{-1}$.
$(\text{e}_\text{s}(\text{T}) - \text{e})_{14}$ = Déficit de saturación del vapor [hPa].

9.2.11 MÉTODO DE JENSEN-HAISE

El método de Jensen-Haise (1963) se considera un método de radiación ya que incorpora a su ecuación valores de radiación solar al reconocer en el método la relación existente entre una fuente de energía y la evaporación.

Existe una alta correlación entre la relación evapotranspiración-radiación solar neta recibida por el cultivo.

Para el desarrollo de su fórmula, estos autores utilizaron más de 3000 observaciones de evapotranspiración actual determinadas mediante muestras de suelo y estadísticamente, relacionaron Rs y E_{tr} mediante la siguiente expresión:

1º) Calculamos la presión de vapor a saturación correspondiente a la temperatura media de las máximas y de las mínimas de cada mes:

$$e = 6{,}108\ EXP\left(\frac{17{,}27\ t}{t + 237{,}3}\right)$$

Donde:

e = Presión de vapor de saturación (mbar) correspondiente a la temperatura t (ºC).

2º) Calculamos los coeficientes C_T y T_x, necesarios para la fórmula:

$$C_T = \frac{1}{38 - \frac{h}{152{,}5} + \frac{380}{e2 - e1}}$$

Donde:

h = Altitud del lugar (metros).

3º) Cálculo de Rs (Radiación solar incidente sobre la superficie)

Si disponemos de medidas de Rs en otrras unidades, podemos convertirlas a su equivalente en mm/día:

• Para pasar de KJulio/m2/día a cal /cm2 /día, multiplicar por 0,023885
• Para pasar de cal /cm2 /día a mm./día (de agua evaporada) multiplicar por : 10 / (597,3 -0,57 T) ; donde T= temperatura media del periodo elegido. Con un mínimo error, basta multiplicar por 0,017.

Si no disponemos de medidas directas de Rs podemos evaluarlo a partir del número de horas de sol (n), mediante la expresión siguiente:

$$R_s = R_o(0{,}18 + 0{,}55\frac{n}{N})$$

Donde:

Ro = Radiación solar si no existiera atmósfera (Tabla)
n= número de horas de sol reales (medidas con un heliógrafo)
N = número máximo teórico de horas de sol (Tabla)

Si tampoco disponemos de medidas de horas de sol reales (n), se puede estimar n/N aproximadamente, para la zona estudiada, por ejemplo: 0,8 para los meses de verano, 0,6 para primavera y otoño, 0,4 para invierno.

4º)

$$ETP = CT\ (T\text{-}Tx)\ .\ Rs$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración mm/día.
Rs = Radiación solar incidente a nivel del suelo (cal/cm2/dia ó mm/día).
T = temperatura media del periodo de cálculo elegido (semana, mes,...).

Radiación extraterrestre para el hemisferio norte expresada en vaporización equivalente (mm/día)												
LATITUD	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
50	3,8	6,1	9,4	12,7	15,8	17,1	16,4	14,1	10,9	7,4	4,5	3,2
48	4,3	6,6	9,8	13	15,9	17,2	16,5	14,3	11,2	7,8	5	3,7
46	4,9	7,1	10,2	13,3	16	17,2	16,6	14,5	11,5	8,3	5,5	4,3
44	5,3	7,6	10,6	13,7	16,1	17,2	16,6	14,7	11,9	8,7	6	4,7
42	5,9	8,1	11	14	16,2	17,3	16,7	15	12,2	9,1	6,5	5,2
40	6,4	8,6	11,4	14,3	16,4	17,3	16,7	15,2	12,5	9,6	7	5,7
38	6,9	9	11,8	14,5	16,4	17,2	16,7	15,3	12,8	10	7,5	6,1
36	7,4	9,4	12,1	14,7	16,4	17,2	16,7	15,4	13,1	10,6	8	6,6
34	7,9	9,8	12,4	14,8	16,5	17,1	16,8	15,5	13,4	10,8	8,5	7,2
32	8,3	10,2	12,8	15	16,5	17	16,8	15,6	13,6	11,2	9	7,8
30	8,8	10,7	13,1	15,2	16,5	17	16,8	15,7	13,9	11,6	9,5	8,3
28	9,3	11,1	13,4	15,3	16,5	16,8	16,7	15,7	14,1	12	9,9	8,8
26	9,8	11,5	13,7	15,3	16,4	16,7	16,6	15,7	14,3	12,3	10,3	9,3
24	10,2	11,9	13,9	15,4	16,4	16,6	16,5	15,8	14,5	12,6	10,7	9,7
22	10,7	12,3	14,2	15,5	16,3	16,4	16,4	15,8	14,6	13	11,1	10,2
20	11,2	12,7	14,4	15,6	16,3	16,4	16,3	15,9	14,8	13,3	11,6	10,7
18	11,6	13	14,6	15,6	16,1	16,1	16,1	15,8	14,9	13,6	12	11,1
16	12	13,3	14,7	15,6	16	15,9	15,9	15,7	15	13,9	12,4	11,6
14	12,4	13,6	14,9	15,7	15,8	15,7	15,7	15,7	15,1	14,1	12,8	12
12	12,8	13,9	15,1	15,7	15,7	15,5	15,5	15,6	15,2	14,4	13,3	12,5
10	13,2	14,2	15,3	15,7	15,5	15,3	15,3	15,5	15,3	14,7	13,6	12,9
8	13,6	14,5	15,3	15,6	15,3	15	15,1	15,4	15,3	14,8	13,9	13,3
6	13,9	14,8	15,4	15,4	15,1	14,7	14,9	15,2	15,3	15	14,2	13,7
4	14,3	15	15,5	15,5	14,9	14,4	14,6	15,1	15,3	15,1	14,5	14,1
2	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
0	15	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

Tabla 22. Radiación extraterrestre para el hemisferio norte expresada en evaporación equivalente (mm/día) (Doorenbos y Pruit, 1977).

9.2.12 MÉTODO DE PENNAN

Penman (1948) fue el primero que combinó una fuente de energía y un mecanismo de eliminación de vapor de agua de una superficie evaporante. Dos factores que son ingredientes esenciales en la evapotranspiración.

La ecuación de Penman es la siguiente:

$$ET_0 = c * (W * R_n + (1 - W) * f(u) * (e_a - e_d)$$

Siendo:

ET_0 = Evaporación de referencia en [mm/día].
W = factor de ponderación relativo a la temperatura.
R_n = Radiación neta, corresponde a la diferencia entre todos los ingresos y salidas de radiación. Expresada en equivalente [mm/día].
f(u) = función relativa al viento medido a 2 metros de elevación sobre el suelo.
$(e_a - e_d)$ = Diferencia entre la presión de vapor de saturación para la temperatura media del aire y la presión de vapor actual en [mbar].
C = factor que compensa el efecto de las condiciones climáticas del día y la noche, y se encuentra tabulado para distintas condiciones meteorológicas.

La ecuación de Penman asume que las condiciones normales son de radiación media a alta, que la máxima humedad relativa es media a alta y que el viento diario normal es el doble del nocturno. Sin embargo estas condiciones "normales" no corresponden con la realidad de todos los puntos del planeta, siendo estas muy variables dependiendo de la latitud, longitud, altitud y época del año. Tal variabilidad se observa en la Tabla 23 que resume los valores del coeficiente c para adaptar los resultados a distintas condiciones de humedad relativa promedio máxima diaria, al cociente entre la velocidad promedio del viento en el día y en la noche, a la radiación solar expresada en equivalente mm/día y a la velocidad promedio del viento durante el día.

No hay suficientes mediciones en la mayoría de las estaciones, solo unas pocas registran los datos necesarios para la aplicación de éste método.

Los valores de c de la Tabla 23 han sido obtenidos por distintos e estudios experimentales presentados en la monografía de FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977).

	Rhmax=30%				Rhmax=60%				Rhmax=90%			
Rs (mm/día)	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
Udia (m/s)	Udía/Unoche = 4											
0	0,86	0,9	1	1	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,1	1,1
3	0,79	0,84	0,92	0,97	0,92	1	1,11	1,19	0,99	1,1	1,27	1,32
6	0,66	0,77	0,87	0,93	0,85	0,96	1,11	1,19	0,94	1,1	1,26	1,33
9	0,55	0,65	0,78	0,9	0,76	0,88	1,02	1,14	0,88	1,01	1,16	1,27
	Udía/Unoche = 3											
0	0,86	0,9	1	1	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,1	1,1
3	0,76	0,81	0,88	0,94	0,87	0,96	1,06	1,12	0,94	1,04	1,18	1,28
6	0,53	0,68	0,81	0,88	0,77	0,88	1,02	1,1	0,86	1,01	1,15	1,22
9	0,46	0,58	0,72	0,82	0,67	0,79	0,88	1,05	0,78	0,92	1,06	1,18
	Udía/Unoche = 2											
0	0,86	0,9	1	1	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,1	1,1
3	0,69	0,76	0,85	0,92	0,83	0,91	0,99	1,05	0,89	0,98	1,1	1,14
6	0,53	0,61	0,74	0,84	0,7	0,8	0,94	1,02	0,79	0,92	1,05	1,12
9	0,37	0,48	0,65	0,76	0,59	0,7	0,84	0,95	0,71	0,81	0,96	1,05
	Udía/Unoche = 1											
0	0,86	0,9	1	1	0,96	0,98	1,05	1,05	1,02	1,06	1,1	1,1
3	0,64	0,71	0,82	0,89	0,78	0,86	0,94	0,99	0,85	0,92	1,01	1,05
6	0,43	0,53	0,68	0,79	0,62	0,7	0,84	0,93	0,72	0,82	0,95	1
9	0,27	0,41	0,59	0,7	0,5	0,6	0,75	0,87	0,62	0,72	0,87	0,96

Tabla 23. Valores del coeficiente C de Pennan para distintas condiciones climáticas (FAO paper Nro 24 Irrigation and Drainage, 1977).

Las fórmulas de cada uno de los parámetros de la ecuación de Penman para el cálculo de oET en mm/día se resumen a continuación:

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

$$\gamma = 0{,}671$$

$$\Delta = \frac{4098 * e_a}{(273{,}3 + T)^2}$$

Donde:

γ: Constante psicrométrica (mbar/°C).
e_a : Presión de vapor de saturación en mbar.
Δ: Gradiente de la curva de presión de vapor de saturación (mbar/°C).
T: Temperatura media del aire en °C.

$$f(u) = 0{,}27\left(1 + U_2\frac{86{,}4}{100}\right)$$

$$U_2 = 4{,}87\frac{\left(U_z\frac{1000}{3600 * 24}\right)}{ln(67{,}8 * z - 5{,}42)}$$

Donde:

U_2 = Velocidad del viento a 2 metros sobre el suelo en m/s.
U_z = Velocidad del viento a z metros sobre el suelo, en km/día.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$$R_{nl} = \sigma(273{,}15 + T)^4 * (0{,}34 - 0{,}044 * \sqrt{e_d})(0{,}1 + 0{,}9 * \frac{n}{N})$$

Donde:

R_n = Radiación neta, corresponde a la diferencia entre todos los ingresos y salidas de radiación de onda corta y larga. Expresada en equivalente mm/día.
A = Corresponde al albedo o reflexión del agua y es un valor entre [0.05-0.07]
N = Horas de sol efectivas durante el día.
N = Horas de sol máximas teóricas durante el día.
R_{nl} = Radiación de onda larga.
Σ = Constante de Stefan Woltzman.

9.3 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Conocida la escorrentía anual AT es fácil calcular el caudal medio anual en m3/s, con la siguiente expresión:

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

Donde:

Q_m = Caudal medio anual en m^3/s.
A_T = Escorrentía media anual en mm.
S = Superficie de la cuenca en km^2.

Ésta es la fórmula que se implementará para el cálculo del caudal medio en el presente Trabajo Fin de Grado.

Existen otras fórmulas empíricas, más o menos adaptadas a las condiciones climáticas que imperan en la cuenca. Sin embargo, estas resultan siempre engorrosas y los resultados varían sensiblemente con la fórmula empleada.

Existen otros medios de evaluar la escorrentía entre los cuales el más utilizado, en cuencas con una superficie total inferior a 250 km2, es el método de la fórmula racional.

La fórmula racional, nos da el valor de la escorrentía en la desembocadura, a partir de la precipitación en el área de la cuenca, mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = 0{,}2778\ C\ I\ A$$

Donde:

Q_m = Caudal medio anual en m^3/s.
C = Coeficiente de escorrentía (0 ≤ C ≤ 1).
C = 1 - (C1 + C2 + C3).
I = Precipitación en mm/año.
A = Superficie de la cuenca en km^2.
ET = Evapotranspiración real anual en mm.

La fórmula presupone que:

- El aguacero es uniforme y cae sobre toda la superficie de la cuenca.
- El coeficiente de escorrentía es constante durante el periodo de precipitación.
- La escorrentía es máxima cuando toda la superficie de la cuenca contribuye a su formación.

El coeficiente de escorrentía C está compuesto por los siguientes componentes:

Componente topográfico:
Terreno de pendiente suave. C1 = 0,30.
Terreno cuya pendiente varía entre 3 y 30 m/km. C1 = 0,20.
Terreno cuya pendiente varía entre 30 y 45 m/km. C1 = 0,10.

Componente del suelo:
Terreno arcilloso. C2 = 0,10.
Terreno de arcilla y gravilla. C2 = 0,20.
Terreno de arena y gravilla. C2 = 0,40.

Componente de cubierta vegetal:
Terreno de cultivo. C3 = 0,10.
Terreno boscoso. C3 = 0,20.

Siendo C = 1 – (C1 + C2 + C3), tal y como se ha definido anteriormente.

El problema del método reside en la dificultad de definir el valor del coeficiente C.

El coeficiente C viene influenciado fundamentalmente por el tipo de suelos que integran la cuenca, la pendiente del terreno y la cubierta vegetal.

CAPÍTULO 10

DESARROLLO EN EXCEL DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

ÍNDICE

Introducción **135**
Tabla resumen **137**
Procedimiento de cálculo **141**
Insertar datos de cálculo **143**
Resultados **150**
Anexos **155**
Resumen **162**

10. DESARROLLO EN EXCEL DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

En este capítulo se explica el funcionamiento de la herramienta de cálculo, su composición y las posibilidades que nos ofrece.

10.1 INTRODUCCIÓN

Habiendo explicado ya todos los conceptos teóricos que intervienen y los procedimientos de cálculo, se pasa a explicar la herramienta en sí.

Como ya se comentó en la introducción al proyecto la herramienta de cálculo se implementará en Excel con programación en visual basic. El resultado obtenido con la herramienta en Excel es muy visual y procesa de manera rápida todos los métodos, proporcionando una interfaz de usuario muy simple y fácil de seguir, impidiendo que se introduzcan datos erróneos, proporcionándonos el caudal según cada método y finalmente un caudal medio anual.

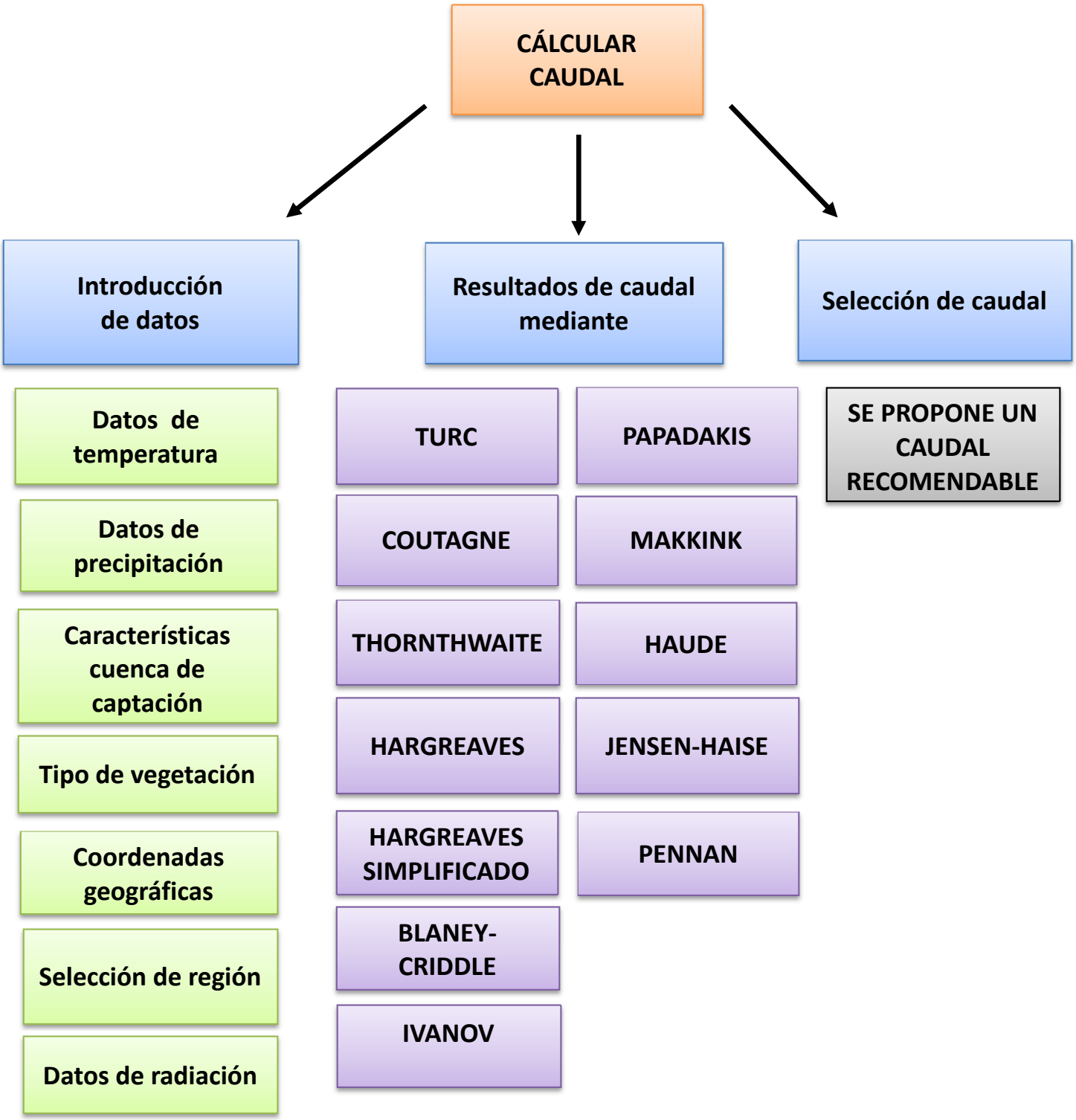
La herramienta está preparada para proporcionar los resultados de todos los métodos al introducir los datos, no obstante si el usuario no dispone de todos los datos, la herramienta proporcionará los resultados de los métodos que sean posibles con los datos introducidos. Cabe añadir, la herramienta tiene metidos bases de datos, que se mostraran en los anexos, para tener que meter el mínimo de datos de la manera más sencilla.

En todas las hojas hay un índice en la parte superior con el que el usuario se puede ir guiando de manera interactiva. Con tan solo pulsar sobre el botón, nos moveremos a la página deseada. En todo momento se puede volver al menú principal.

La introducción de datos se ha realizado mediante paneles de introducción de datos a los que se accede pulsando los respectivos botones de comandos, los cuales nos proporcionaran toda la información necesaria a la hora de rellenar las casillas de datos, incluso mostrando casillas desplegables para facilitar la introducción de datos. Una vez metidos los datos y pulsando el botón ´´aceptar`` podemos visualizar todos los datos que hemos introducido para comprobar algún posible error al introducir dichos datos.

Para la presentación y explicación de la herramienta de cálculo vamos a analizar un caso con cuyos datos ya contamos, vamos a estudiar el caudal medio anual en la ´´Central Purísima Concepción``, en el término municipal de Mengibar, situada en el río Guadalbullón.

A continuación se presenta un diagrama de flujo del proceso de cálculo, con el tipo de datos a introducir, los métodos que cálculo y finalmente la decisión final de selección de un caudal medio anual para nuestro caso.



Expuesto el diagrama de flujo con el funcionamiento se pasa a desarrollar todo el contenido de la Herramienta de cálculo.

Para comenzar, partimos de la siguiente interfaz de usuario al abrir nuestro programa:

Fig. 39. Interfaz herramienta de cálculo.

A partir de dicha interfaz de usuario comenzaremos a desgranar la herramienta de cálculo. Partiendo de la interfaz de usuario al abrir nuestro programa, disponemos de dos botones de comando, uno para acceder a un resumen con el desarrollo de los métodos y alguna indicación relativa a cada uno. Y otro botón de comando para acceder al primer nivel del programa para realizar el cálculo.

10.2 TABLA RESUMEN

Partiendo de la interfaz de usuario al abrir nuestro programa, disponemos de dos botones de comando, si seleccionamos el botón ´´TABLA RESUMEN MÉTODOS`` este nos lleva al siguiente resumen teórico de los métodos, en el que se exponen las fórmulas para el cálculo de evapotranspiración, escurrimiento y cálculo de caudal para cada método. Cabe señalar que las fórmulas que se muestran en dicho resumen son las propias de cada método, no obstante la herramienta de cálculo procesa más ecuaciones previas para poder llegar a utilizar las ecuaciones de cada método, las cuales están en los capítulos previos a los métodos de evapotranspiración de nuestra memoria. Se añade también la descripción de cada variable, características, recomendaciones y ventajas de cada método.

Aquí tenemos la ´´TABLA RESUMEN MÉTODOS``:

TABLA RESUMEN MÉTODOS

MÉTODO DE TURC

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$A_T = P - ETR$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ETR	Evapotranspiración real en mm/año
P	Precipitación real en mm/año
L	300+25t+0,05*t^2
t	Temperatura media anual en °C
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

La limitación de ésta fórmula es que para P<0.3*L, daría una ETR mayor a la precipitación. Se recomienda en regiones húmedas.

MÉTODO DE COUTAGNE

$$ETR = P - \chi \cdot P^2$$

$$\chi = \frac{1}{0{,}8 + 0{,}14 \cdot t}$$

$$A_T = P - ETR \qquad Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

La fórmula sólo es válida para valores de la precipitación comprendidos entre 1/8χ y 1/2χ

ETR	Evapotranspiración real en metros/año.
P	Precipitación en metros/año.
t	Temperatura media anual en ºC
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

No da buenos resultados para regiones áridas. Se implementó para regiones húmedas.

MÉTODO DE THORNTHWAITE

1º $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1{,}514}$

2º $I = \sum i$

3º $ETP_{Sin\ Corregir} = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I}\right)^a$

4º $ETP = ETP_{SC} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$

$$a = 675 \cdot 10{-}9 \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0{,}49239$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79 \frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

N	Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud
d	Número de días del mes
ETP	Evapotranspiración potencial corregida
ETPsc	ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

La principal ventaja es que usa datos climatológicos accesibles. Da buenos resultados en zonas húmedas y con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas.

MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE

$$F = \sum_{i=1}^{n} f_i \qquad f_i = P_i\left(\frac{T_i + 17{,}8}{21{,}8}\right) \qquad E_t = k_g * F$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ET	Evapotranspiración durante el ciclo vegetativo
F	Factor de temperatura y luminosidad
kg ó Kc	Coeficiente global de desarrollo
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Da una estimación de la evapotranspiración real más que de la potencial, ya que se basa en correlaciones de prácticas de riego existentes.

MÉTODO DE IVANOV

Para el cálculo diario de ETP

$$\text{ETP} = 0{,}000036\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

ETP	Evapotranspiración Ivanov [mm dia]^(-1)
T	Temperatura media aire para un intervalo de tiempo[ºC]
RH	Humedad media del aire [%]

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}} \qquad Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Para el cálculo mensual de ETP

$$\text{ETP} = 0{,}0011\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

ETP	Evapotranspiración Ivanov [mm mes]^(-1)
T	Temperatura media aire para un intervalo de tiempo[ºC]
RH	Humedad media del aire [%]

Ivanov surge como una modificación al método de Turc para implementar el método también para temperaturas positivas. Y se presentan dos fórmulas una para el cálculo mensual y otra para el cálculo diario.

MÉTODO DE HAUDE

$$ETP = f\,(e_s(T) - e)_{14} \leq 7\ mm/d \qquad A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

ETP	Evapotranspiración Haude [mm dia]^(-1)
f	Factor de Haude para meses individuales [mm hPa]^(-1)
(es-ed)	Déficit de saturación del vapor [hPa]
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Para los valores de evapotranspiración diaria el enfoque de Haude puede ser inexacto. Se recomienda utilizar para la estimación de sumas o promedios mensuales.

MÉTODO DE PAPADAKIS

$$ETP_{PAP\ i} = 5{,}625\ [e^0(T_i) - e(t_i - 2)] \qquad A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}} \qquad Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

eº (Ti)	Tensión de saturación de vapor para temperatura media de las máximas del mes(mb)
eº (Ti-2)	Tensión de saturación de vapor para la temperatura media de mínimas menos 2 ºC (mb)
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE JESEN-HAISE

1º $e = 6{,}108\ EXP\left(\frac{17{,}27\ t}{t+237{,}3}\right)$

2º $C_T = \frac{1}{38-\frac{h}{152{,}5}+\frac{380}{e2-e1}}$

3º $R_s = R_o(0{,}18 + 0{,}55\frac{n}{N})$

4º $\mathrm{ETP} = \mathrm{CT}\ (\mathrm{T}-\mathrm{Tx})\ \ \mathrm{Rs}$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

e	Presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura t (ºC)
h	Altitud del lugar (metros)
Ro	Radiación solar si no existiera atmósfera
Rs	Radiación solar incidente a nivel del suelo (cal/cm2/dia ó mm/día)
T	temperatura media del periodo de cálculo elegido
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Se considera un método de radiación. Y existe una alta correlación entre la relación evapotranspiración-radiación solar neta recibida por el cultivo.

MÉTODO DE MAKKINK

$$\frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \qquad ETP = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\left(c1\frac{R_s}{L} + c2\right)$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ETP	Evapotranspiración makkink
Rs	Radiación solar incidente a nivel del suelo (mm/día)
C1	Coeficiente de Makkink
C2	Coeficiente de Makkink
Δ	Pendiente curva de saturación para temperatura media
γ	Constante psicrométrica
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Makkink usando como base sus experiencias en Holanda, deja demostrado que da buenos resultados en climas húmedos y fríos pero no en regiones áridas

MÉTODO DE HARGREAVES

$$\mathrm{ET0} = 0{,}0135 \cdot (\mathrm{tmed} + 17{,}78) \cdot \mathrm{Rs}$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}} \qquad Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ETO	Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)
Tmed	Temperatura media en ºC
Rs	Radiación solar incidente, convertida en mm/día
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE HARGREAVES SIMPLIFICADO

$$ETO = 0{,}0023 \cdot (t_{med} + 17{,}78) \cdot R_0 \cdot \sqrt{(t_{máx} - t_{mín})}$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ETO	Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)
Tmed	Temperatura media en ºC
Rs	Radiación solar extraterrestre en mm/día
tmáx	Temperatura diaria máxima
tmin	Temperatura diaria mínima
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE PENNAN

$$ET_0 = c * (W * R_n + (1 - W) * f(u) * (e_a - e_d)$$

$$A_T = P_T * e^{-0,79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \qquad \gamma = 0,671 \qquad \Delta = \frac{4098 * e_a}{(273,3 + T)^2}$$

$$Q_m = A_T * S * 3,17 * 10^{-5}$$

$$f(u) = 0,27\left(1 + U_2 \frac{86,4}{100}\right) \qquad U_2 = 4,87 \frac{\left(U_z \frac{1000}{3600 * 24}\right)}{ln(67,8 * z - 5,42)}$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \qquad R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$$R_{nl} = \sigma(273,15 + T)^4 * (0,34 - 0,044 * \sqrt{e_d})(0,1 + 0,9 * \frac{n}{N})$$

Penman fue el primero que combinó una fuente de energía y un mecanismo de eliminación de vapor de agua de una superficie evaporante. Dos factores que son ingredientes esenciales en la evapotranspiración. No hay suficientes mediciones en la mayoría de las estaciones, solo unas pocas registran los datos necesarios para la aplicación de éste método.

ETO	Evaporación de referencia en [mm/día]
W	Factor de ponderación relativo a la temperatura
Rn	Radiación neta [mm/día]
f(u)	Función relativa al viento medido a 2 metros
(ea-ed)	Diferencia entre la presión de vapor de saturación
c	Factor compensa el efecto condiciones climáticas
γ	Constante psicrométrica (mbar/°C)
ea	Presión de vapor de saturación en mbar
Δ	Gradiente de la curva de presión de vapor de saturación (mbar/°C)
T	Temperatura media del aire en °C
U2	Velocidad del viento a 2 metros sobre el suelo en m/s
Uz	Velocidad del viento a z metros sobre el suelo, en km/día
Rs	Radiación neta, diferencia entre ingresos y salidas radiación onda corta y larga (mm/día)
α	Corresponde al albedo o reflexión del agua y es un valor entre [0.05-0.07]
n	Horas de sol efectivas durante el día
N	Radiación de onda larga
Rnl	Radiación de onda larga
σ	Constante de Stefan Woltzman
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Tabla 24. Tabla resumen de los métodos implementados.

10.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Accediendo mediante la pantalla de inicio de nuestra interfaz de usuario, a través del botón de comando ´´PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO``, llegamos a la primera introducción de datos de nuestra herramienta, dicha introducción de datos cabe señalar que es simplemente para especificar las características a nivel informativo del lugar donde queremos realizar el estudio, ninguno de estos datos se toma en los posteriores cálculos que realizará la herramienta, sin embargo es de interés ya que se verá reflejado en el informe que nos proporciona la Herramienta de cálculo.

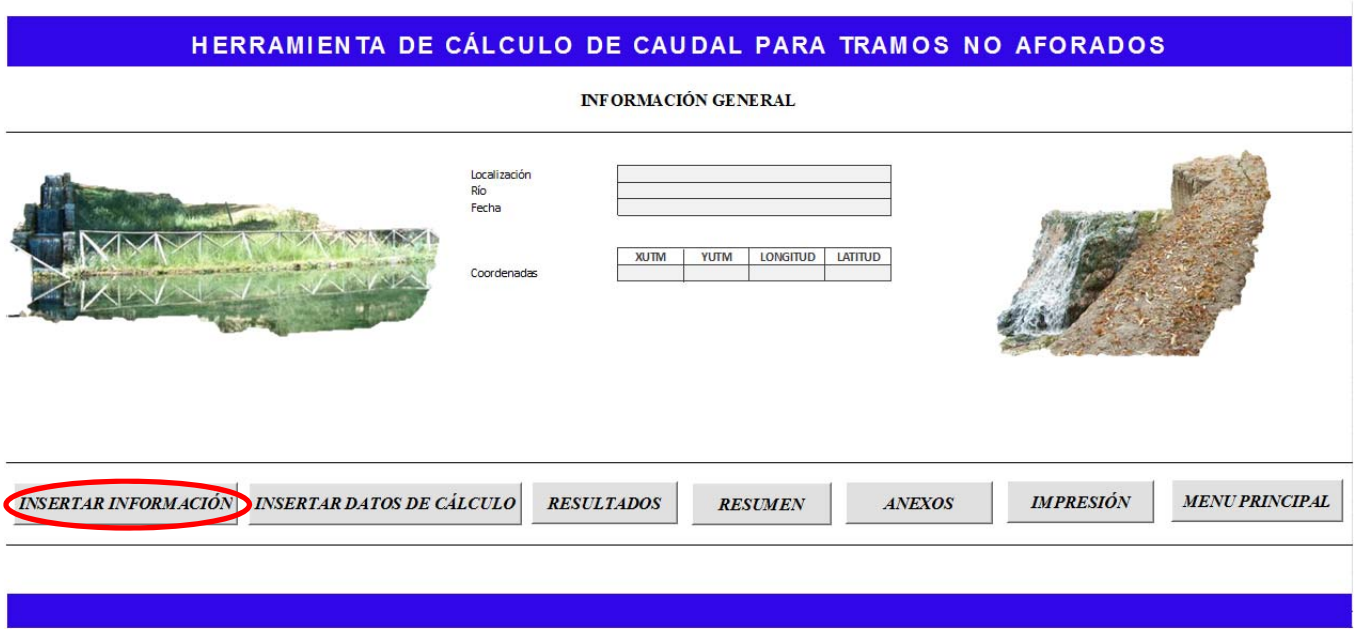


Fig. 40. Hoja Procedimiento de cálculo. Herramienta de cálculo.

En la parte inferior de la página de información general tenemos, todos los botones de comando necesarios para acceder a todos los apartados de la herramienta de cálculo, desde los cuales podemos volver a esta página de nuevo.

En este primer apartado procederemos a una primera introducción de datos generales a través del primer botón, indicado en la imagen con un círculo, el botón ´´INSERTAR INFORMACIÓN``.

Una vez pulsamos dicho botón accedemos al siguiente panel de inserción de datos.

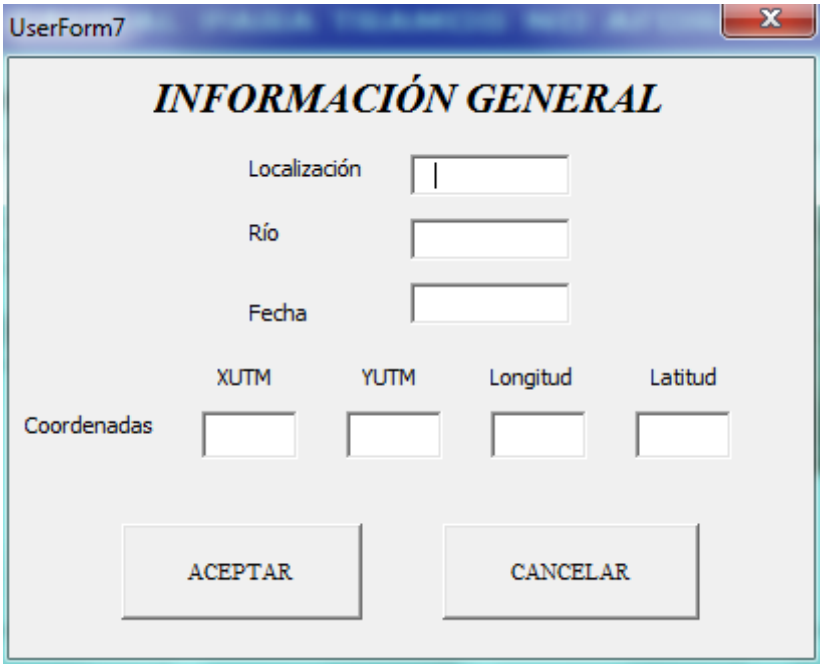


Fig. 41. Panel de información general.

Donde introducimos la localización del punto del río donde queremos realizar el estudio del caudal, el nombre del río, fecha y las coordenadas UTM y coordenadas geográficas de la ubicación en la que nos disponemos a realizar el estudio. Le damos a aceptar, y volvemos a la página de ´´INFORMACIÓN GENERAL`` con los datos generales ya metidos, pudiendo visualizar estos en dicha pantalla. Estos datos se mostraran en la impresión en pdf, es decir constaran en el informe que proporcionará nuestra herramienta.

10.4 INSERTAR DATOS DE CÁLCULO

Desde la página de ´´INFORMACIÓN GENERAL`` accedemos mediante el segundo botón que tenemos en la parte inferior al apartado de inserción de datos de cálculo.

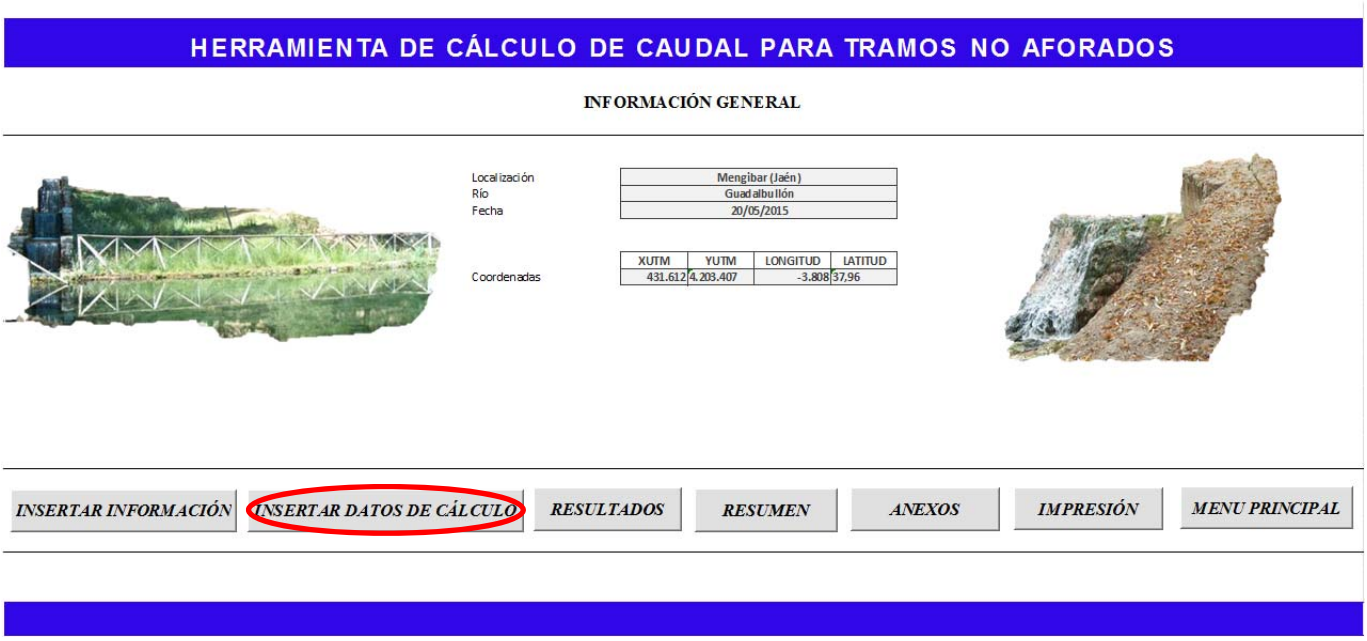


Fig. 40. Hoja Procedimiento de cálculo. Herramienta de cálculo.

Estando en el apartado de inserción de datos de cálculo, disponemos de tres botones de comando.

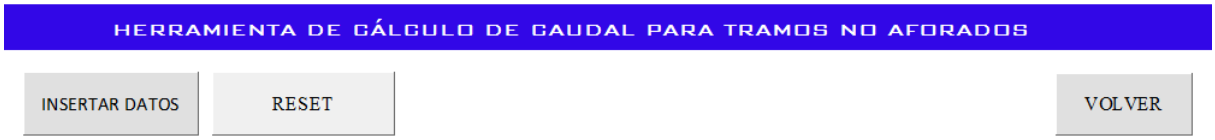


Fig. 42. Hoja Inserción de datos. Herramienta de cálculo.

Uno para insertar los datos de cálculo, que nos mostrará el siguiente panel de introducción de datos:

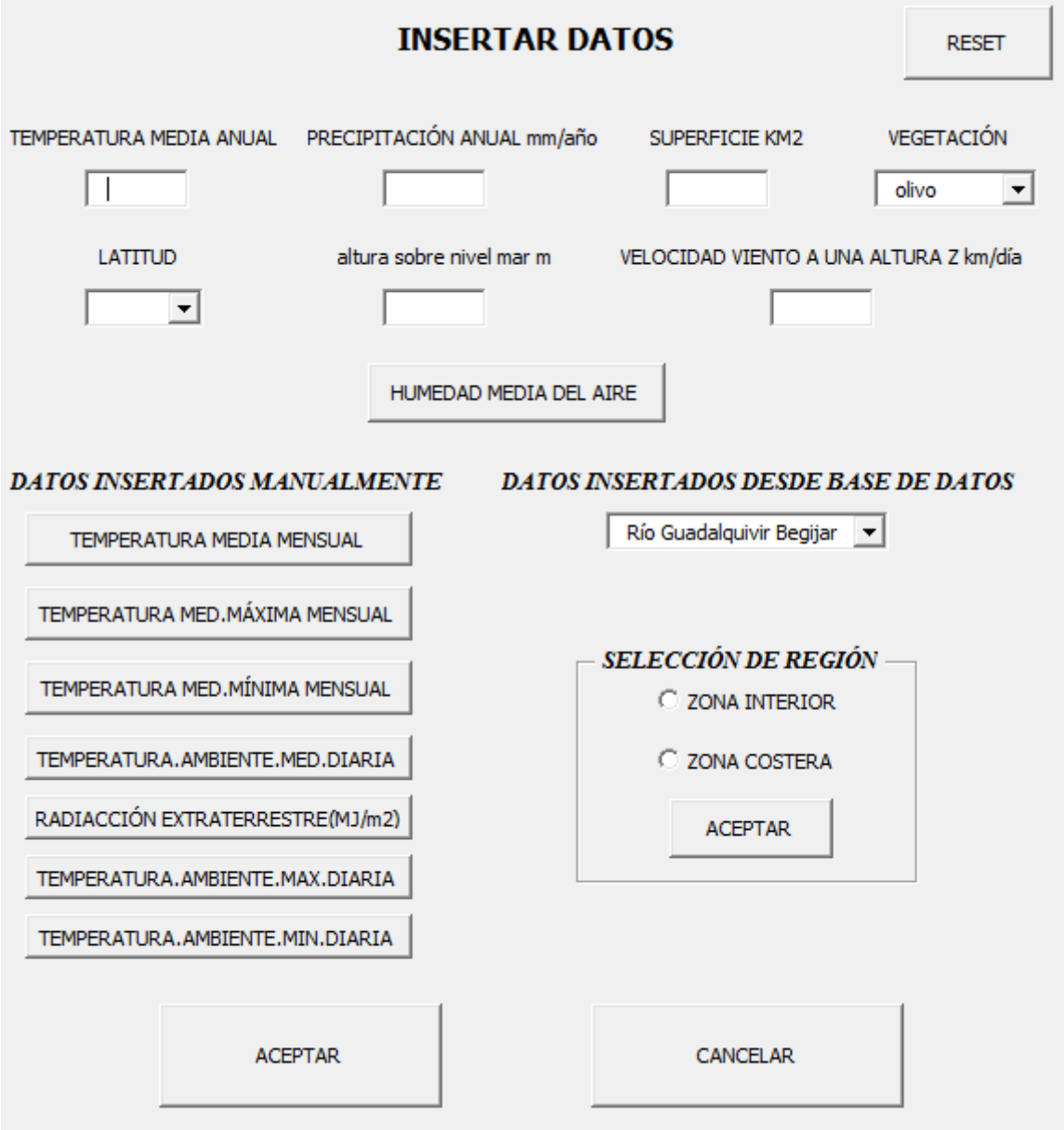


Fig. 43. Panel de insertar datos 1.

Otro para resetear toda la hoja de cálculo exceptuando la anterior página de datos generales la cual se borrará automáticamente para el siguiente caso. Cabe recalcar la importancia de pulsar el botón de reset antes de la introducción de ningún dato de cálculo, la herramienta te pedirá todos los datos que necesites, se podrá comprobar que dichos datos están bien metidos, no obstante si no introduces algún dato puede tomar el de estudios anteriores. Como podemos ver en la anterior imagen del panel de datos, se vuelve a colocar un botón de reset en el panel de introducción de datos.

Y por último un botón para volver al apartado de ´´INFORMACIÓN GENERAL``.

Una vez descritos los botones de los que dispone dicha página, pasamos a describir el panel de datos del botón ´´INSERTAR DATOS``. Lo vamos a analizar seccionándolo debido al tamaño.

En primer lugar tenemos, en la esquina superior derecha otro botón de reset, ya mencionado, y comenzamos la introducción de datos de cálculo, con la temperatura media anual, precipitación anual, superficie, el tipo de vegetación de la cuenca de captación del punto a estudiar, la latitud a la que nos encontramos, la altura sobre el nivel del mar y la velocidad del viento a una altura z.

Fig. 44. Panel de insertar datos. Principales variables.

Estos datos que acabamos de comentar son los más generales, los cuales nos proporcionan los métodos de cálculo más sencillos como pueden ser Turc o Coutagne entre otros, pasamos ahora a la introducción de datos mensuales o anuales, los cuales han sido sacados de los sistemas SAIG de la Junta de Andalucía en nuestro caso, en este apartado se optó por un camino que aunque no es necesario para la herramienta de cálculo, a no ser que nos remitamos a su uso en Andalucía, decidí implementar una base de datos, con datos de SAIG de la Junta de Andalucía, para una serie de centrales minihidráulicas de la provincia de Jaén, fue una tarea minuciosa ir añadiendo todos los datos a la herramienta, pero dichos datos serán aplicados en la realización de un estudio para comparar los métodos de cálculo, lo veremos en el siguiente capítulo.

Luego tenemos dos caminos a seguir si nuestro punto de estudio estuviera cerca de algunos puntos de nuestra base de datos podríamos optar por este camino, o por el contrario añadir los datos manualmente lo cual parece ser obviamente el objeto de la herramienta, no se ha pretendido hacer una base de datos como ya se ha mencionado.

Insertar dichos datos mediante la base de datos:

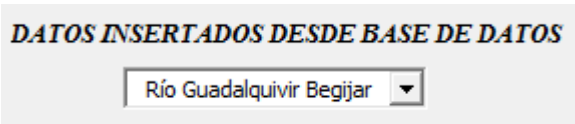


Fig. 45. Panel inserción datos. Datos insertados desde base de datos.

Insertar los datos manualmente:

Fig. 46. Panel. Datos insertados manualmente

Tenemos que introducir 6 tipos de datos de temperatura y la radiación extraterrestre. Pulsando cada uno de estos botones de comando accedemos a un nuevo panel para introducir los datos.

Los paneles de temperaturas medias serían de la siguiente manera, una vez introducidos los datos aceptamos y volvemos al panel de datos anterior.

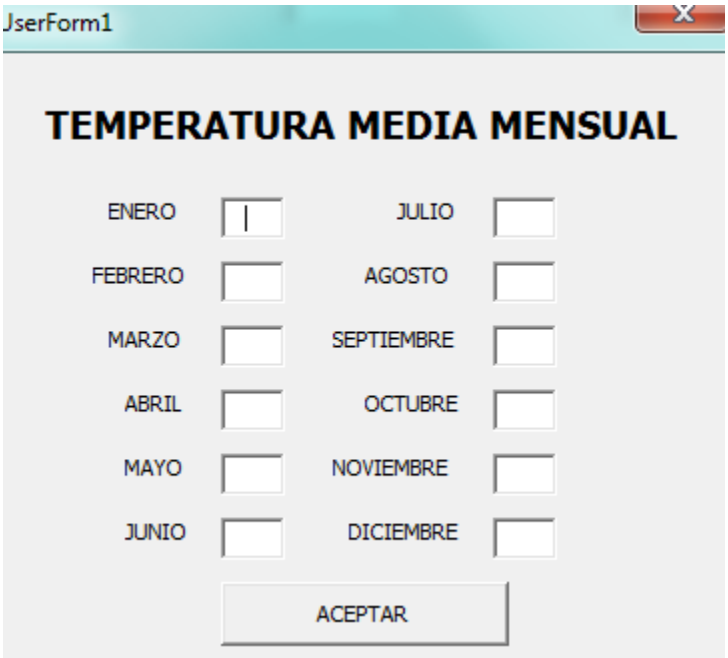


Fig. 47. Panel. Inserción temperatura media mensual.

El panel de datos para temperaturas anuales será como en la Figura 48, como se puede apreciar es una tarea tediosa pero sencilla.

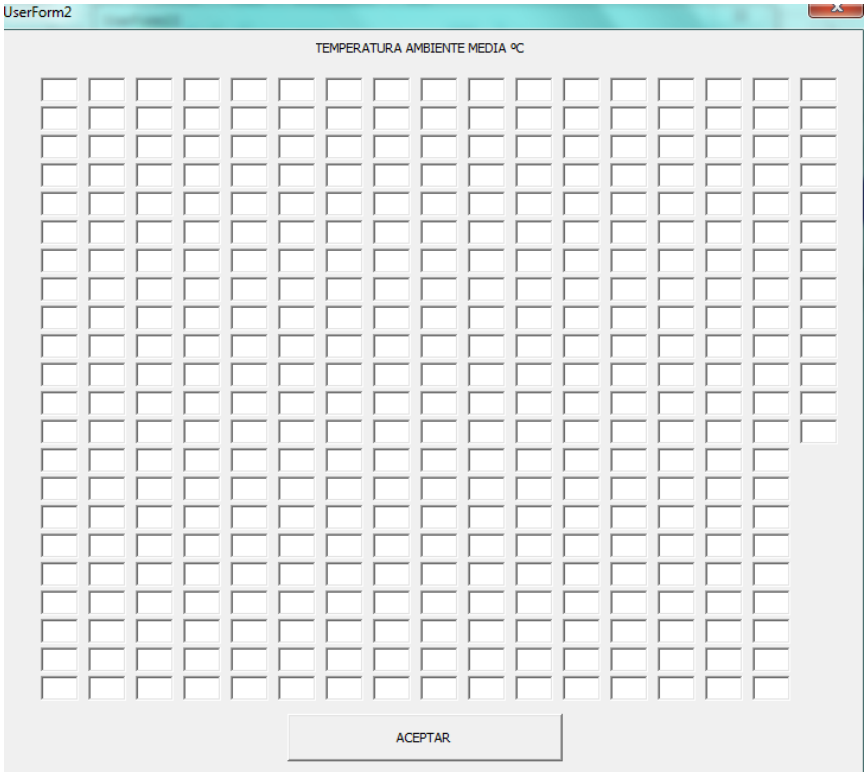


Fig. 48. Panel. Inserción temperatura ambiente media.

Y por último la introducción de datos de radiación extraterrestre sería:

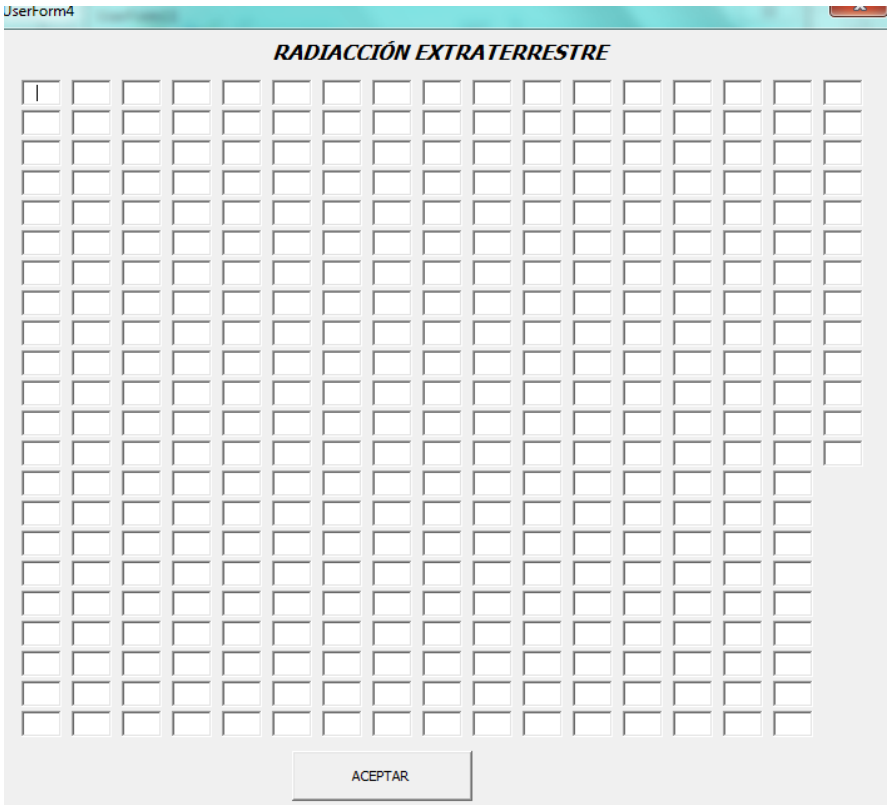


Fig. 49. Panel. Inserción temperatura ambiente media.

La última parte que se incluye en el panel de insertar datos sería el módulo de selección de región, donde seleccionamos si nos encontramos en una región de interior o costera, tendríamos que darle a aceptar para que se introduzca el dato, no basta con seleccionarlo.

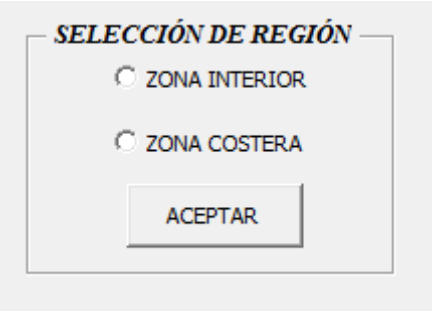


Fig. 50. Panel. Selección de región.

Definidos los apartados de dicho panel de datos, procedemos a introducir los datos, como se definió en la introducción a este capítulo analizaremos a modo de ejemplo el caudal que pasa por Mengibar, en el río Guadalbullón. En este caso vamos por el camino de base de datos, dado que tenemos introducido este punto, ya que forma parte del posterior estudio de centrales minihidráulicas.

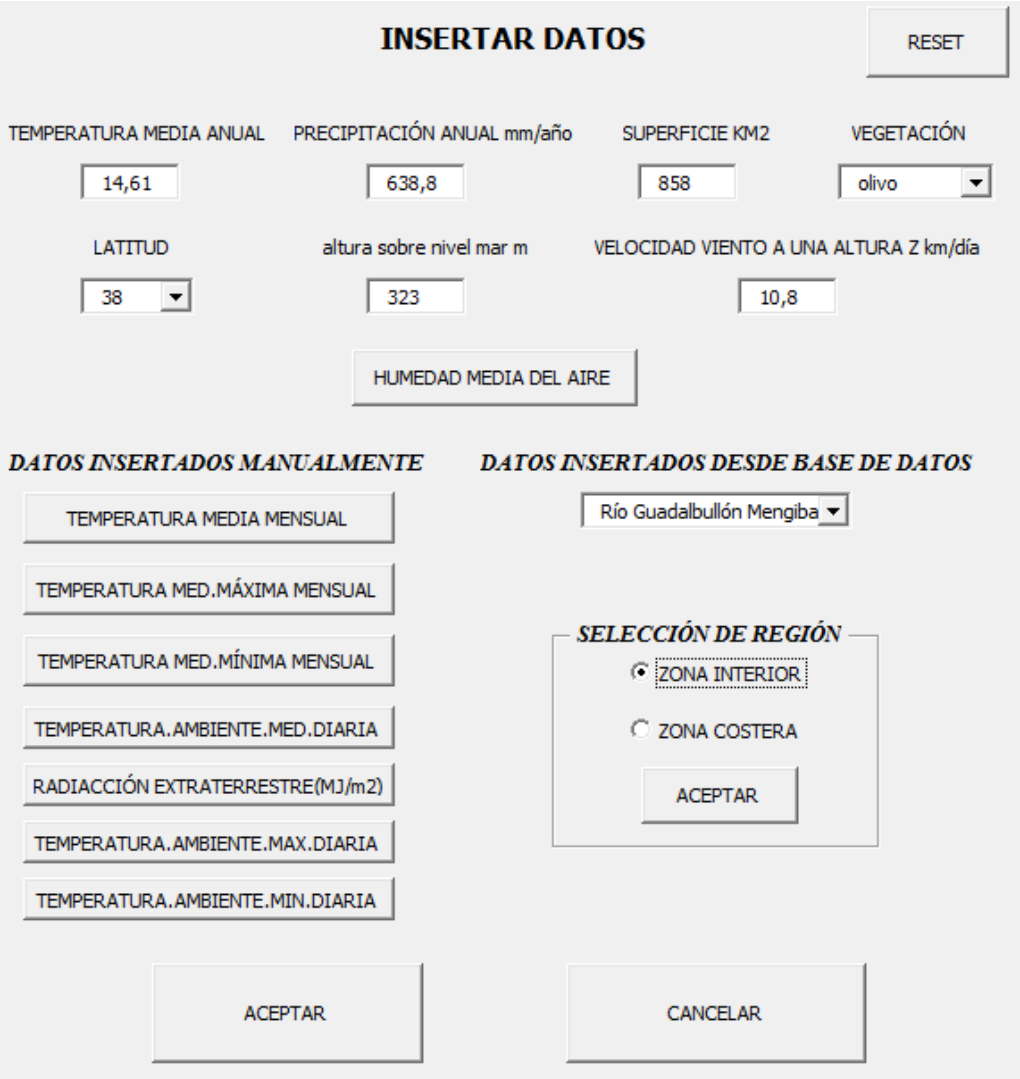


Fig. 51. Panel. Inserción datos 2.

Le damos a aceptar e inmediatamente podemos visualizar todos los datos con los que vamos a partir en el cálculo del caudal, los cuales al igual que los datos de información general también saldrán reflejados en el posterior informe que proporcionará la herramienta en PDF.

Una vez que le damos a aceptar comienza a procesar los datos, nos mostrará una barra de progreso durante el cálculo, que no pasará de los 6 u 8 segundos, relativamente rápido para el número de cálculos implementados.

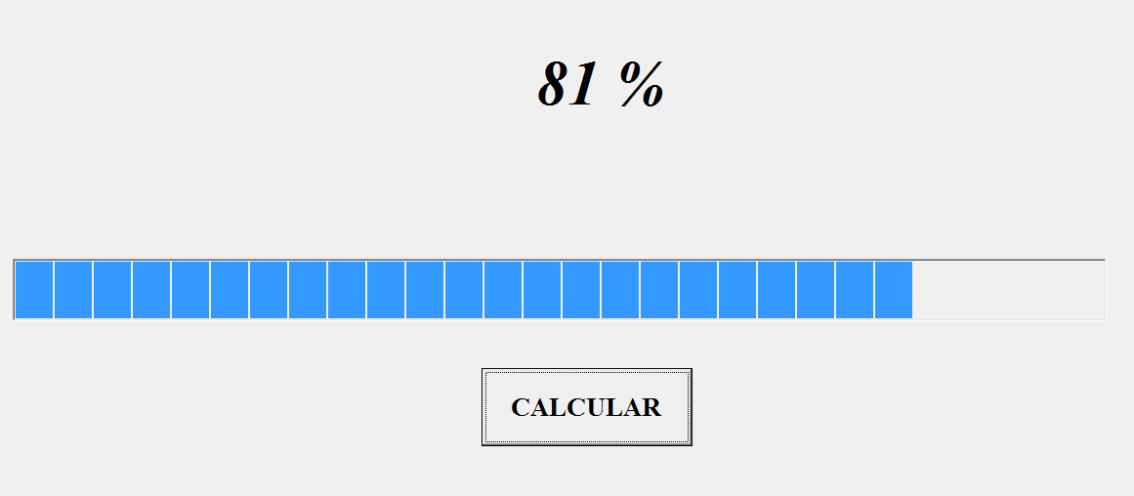


Fig. 52. Barra de progreso.

Al finalizar el cálculo visualizamos los datos que hemos introducido y comprobamos que todo esté correcto.

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL

temperatura media anual (ºC)	14,61
precipitación anual (mm/año)	638,8
superficie (km2)	858
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6
	10,8

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,24885572	8,56332115	12,7493606	14,0863873	18,7794749	26,5195734	27,2749297	27,4805848	19,3979327	13,5346067	10,7769387	8,05283678

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
14,3225806	15,82142857	19,9354839	21,23333333	26,80645161	34,5333333	35,58064516	35,67741935	29,9	23,77419355	17,2	14,58064516

TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,12903226	1,642857143	5,90322581	6,933333333	10,09677419	15,2	16,77419355	17,80645161	14,96666667	11	5,133333333	2,580645161

Tabla 25. Datos iniciales de partida 1.

10.5 RESULTADOS

Desde la pantalla de ´´INFORMACIÓN GENERAL``, accedemos al apartado de ´´RESULTADOS`` mediante el tercer botón de comando.

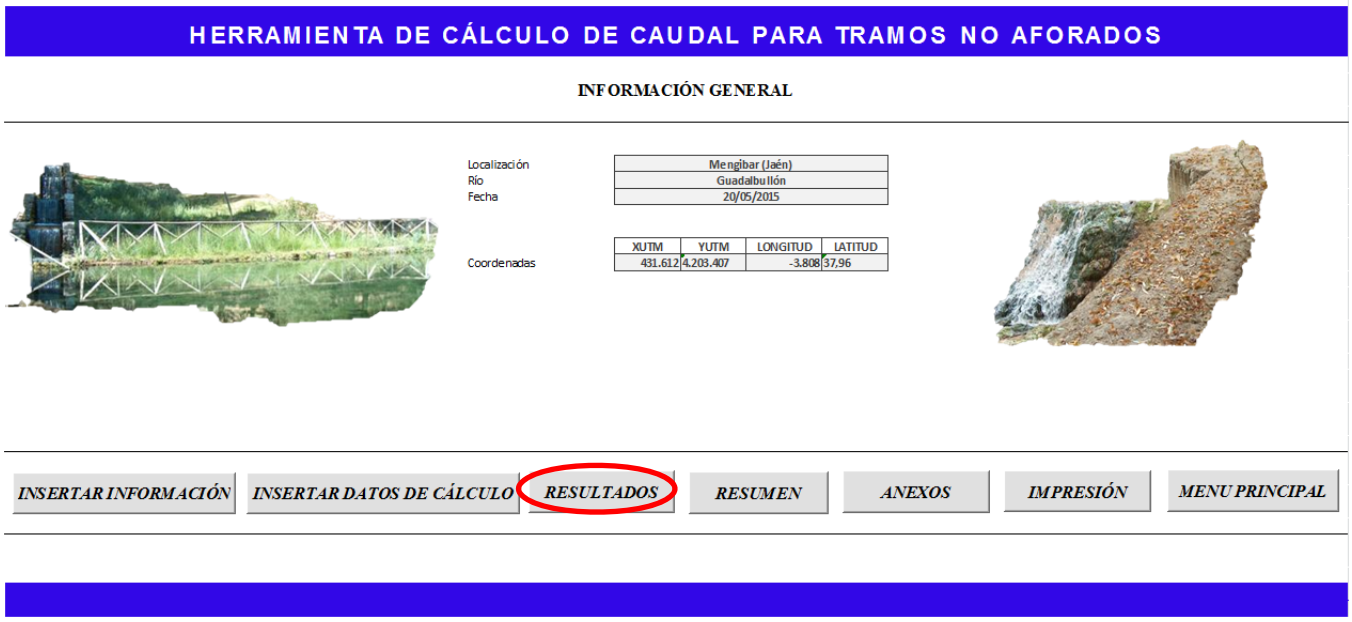


Fig. 40. Hoja Procedimiento de cálculo. Herramienta de cálculo

Una vez en el apartado de ´´RESULTADOS``, tenemos cada uno de los métodos con sus apartados de cálculo resueltos, esta pestaña es secundaria, ya que la que nos interesa será el apartado de ´´RESUMEN`` donde tenemos cada método con su caudal y el caudal recomendable. No obstante puede resultar de utilidad tener todos los parámetros que realiza cada cálculo, ya sea para otro fin que no sea calcular el caudal, y también nos proporciona cálculos para validar dichos métodos.

MÉTODO DE TURC

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$A_T = P - ETR$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

ETR	Evapotranspiración real en mm/año
P	Precipitación real en mm/año
L	300+25t+0,05*t^2
t	Temperatura media anual en °C
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Qm	4,40
AT	161,76
S	858,00
PT	638,8
ET	477,04
t	14,61
0,31*L	CORRECTO

MÉTODO DE COUTAGNE

$$ETR = P - \chi \cdot P^2$$

$$\chi = \frac{1}{0{,}8 + 0{,}14 \cdot t}$$

ETR	Evapotranspiración real en metros/año.
P	Precipitación en metros/año.
t	Temperatura media anual en ºC
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

La fórmula sólo es válida para valores de la precipitación comprendidos entre 1/8χ y 1/2χ

$$A_T = P - ETR$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

Qm	3,90
AT	0,14
S	858,00
PT	0,64
ET	0,50
t	14,61
X	0,35
1/8X	0,36
1/2X	1,42
	NO CUMPLE

MÉTODO DE THORNTHWAITE

1º $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1{,}514}$

2º $I = \sum i$

3º $ETP_{Sin\ Corregir} = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I}\right)^{a}$

4º $ETP = ETP_{SC} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$

$$a = 675 \cdot 10 - 9 \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0{,}49239$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79 \frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

N	Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud
d	Número de días del mes
ETP	Evapotranspiración potencial corregida
ETPsc	ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

t	i	ETPsin corregir	N	d	ETP
7,25	1,75	14,53	9,60	31,00	12,02
8,56	2,26	19,35	10,70	28,00	16,10
12,75	4,13	38,32	11,90	31,00	39,27
14,09	4,80	45,48	13,30	30,00	50,41
18,78	7,42	74,52	14,40	31,00	92,41
26,52	12,50	134,79	15,00	30,00	168,49
27,27	13,05	141,45	14,70	31,00	179,05
27,48	13,20	143,28	13,70	31,00	169,04
19,40	7,79	78,79	12,50	30,00	82,07
13,53	4,52	42,47	11,20	31,00	40,96
10,78	3,20	28,72	10,00	30,00	23,93
8,05	2,06	17,41	9,30	31,00	13,94

Da buenos resultados en zonas húmedas y con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas

Qm	5,80
AT	213,11
I	76,66
a	1,72
ETP(sin corregir)	779,12
ETP	887,68

MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE

$$E_t = k_g * F \qquad F = \sum_{i=1}^{n} f_i \qquad f_i = P_i\left(\frac{T_i + 17{,}8}{21{,}8}\right) \qquad A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}} \qquad Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

t	LATITUD	Kc	fi	ET
7,25	6,87	0,50	7,89	80,29
8,56	6,79	0,50	8,21	80,29
12,75	8,34	0,65	11,69	104,38
14,09	8,90	0,60	13,02	96,35
18,78	9,92	0,55	16,65	88,32
26,52	9,95	0,05	20,23	8,03
27,27	10,10	0,45	20,88	72,26
27,48	9,47	0,45	19,67	72,26
19,40	8,38	0,55	14,30	88,32
13,53	7,80	0,60	11,21	96,35
10,78	6,82	0,65	8,94	104,38
8,05	6,66	0,50	7,90	80,29

ET	Evapotranspiración durante el ciclo vegetativo
F	Factor de temperatura y luminosidad
kg ó Kc	Coeficiente global de desarrollo
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Qm	5,23
AT	192,11
ET	971,55
F	160,59
Kg	0,60

MÉTODO DE IVANOV

Para el cálculo diario de ETP

$$\text{ETP} = 0{,}000036\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

ETP	Evapotranspiración Ivanov [mm dia]^(-1)
T	Temperatura media aire para un intervalo de tiempo[^{0}C]
RH	Humedad media del aire [%]

Para el cálculo mensual de ETP

$$\text{ETP} = 0{,}0011\ (25 + T)^2\ (100 - RH)$$

ETP	Evapotranspiración Ivanov [mm mes]^(-1)
T	Temperatura media aire para un intervalo de tiempo[^{0}C]
RH	Humedad media del aire [%]

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Qm	5,54
AT	203,69
ETP	924,25

t	ETP
7,25	45,76
8,56	49,57
12,75	62,70
14,09	67,22
18,78	84,33
26,52	116,79
27,27	120,24
27,48	121,19
19,40	86,73
13,53	65,34
10,78	56,32
8,05	48,07

MÉTODO DE HAUDE

$$ETP = f\,(e_s(T) - e)_{14} \leq 7\ mm/d$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

f	es	ed	PET	es-ed
6,82	10,19	0,65	65,07	9,54
6,22	11,15	0,68	65,14	10,47
6,82	14,74	0,92	94,28	13,82
8,70	16,08	0,98	131,36	15,10
8,99	21,68	1,22	183,96	20,46
8,40	34,67	1,70	276,95	32,97
9,96	36,24	1,88	342,25	34,36
7,75	36,68	2,01	268,72	34,67
6,90	22,53	1,68	143,91	20,86
6,82	15,51	1,29	96,99	14,22
6,60	12,94	0,87	79,67	12,07
6,82	10,77	0,72	68,51	10,05

ETP	Evapotranspiración Haude [mm dia]^(-1)
f	Factor de Haude para meses individuales [mm hPa]^(-1)
(es-ed)	Déficit de saturación del vapor [hPa]
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Qm	1,84
AT	67,54
ETP	1816,80

MÉTODO DE PAPADAKIS

$$ETP_{PAP\ i} = 5{,}625\ [e^0(T_i) - e(t_i - 2)]$$

e^0 (Ti) Tensión de saturación de vapor para temperatura media de las máximas del mes(mb)
e^0 (Ti-2) Tensión de saturación de vapor para la temperatura media de mínimas menos 2 ^{0}C (mb)

Tmax	Tmin	Tmin-2	e°(Tmin-2)	e°(Tmax)	ETP
14,32	1,13	-0,87	5,73	16,31	59,51
15,82	1,64	-0,36	5,94	17,96	67,61
19,94	5,90	3,90	8,09	23,24	85,22
21,23	6,93	4,93	8,67	25,17	92,81
26,81	10,10	8,10	10,81	35,22	137,31
34,53	15,20	13,20	15,18	54,69	222,24
35,58	16,77	14,77	16,84	58,13	232,26
35,68	17,81	15,81	17,96	58,45	227,76
29,90	14,97	12,97	14,89	42,17	153,45
23,77	11,00	9,00	11,49	29,47	101,14
17,20	5,13	3,13	7,64	19,63	67,44
14,58	2,58	0,58	5,86	16,63	60,58

Qm	2,69
AT	99,04
ETP	1507,33

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

AT Escorrentía total anual en mm
Qm Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE JENSEN-HAISE

1^0 $e = 6{,}108\ EXP\left(\frac{17{,}27\ t}{t+237{,}3}\right)$

2^0 $C_T = \frac{1}{38 - \frac{h}{152{,}5} + \frac{380}{e2-e1}}$

3^0 $R_s = R_o(0{,}18 + 0{,}55\frac{n}{N})$

4^0 ETP = CT (T−Tx) Rs

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

e	Presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura t (ºC).
h	Altitud del lugar (metros)
Ro	Radiación solar si no existiera atmósfera
Rs	Radiación solar incidente a nivel del suelo (cal/cm2/dia ó mm/día)
T	temperatura media del periodo de cálculo elegido
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Qm	4,35
AT	160,11
ETP	1118,88
h	323,00

e2	e1	Tx	Ct	Ro	Rs	ETP(diaria)	ETP
16,32	6,63	-4,44	0,01	6,90	2,00	0,31	9,35
17,98	6,88	-4,64	0,01	9,00	2,61	0,49	14,74
23,29	9,29	-5,05	0,02	11,80	6,02	1,70	50,98
25,23	9,97	-5,22	0,02	14,50	7,40	2,35	70,47
35,25	12,36	-6,29	0,02	16,40	8,36	4,00	119,87
54,79	17,27	-8,34	0,02	17,20	10,66	8,08	242,39
58,06	19,10	-8,54	0,02	16,70	10,35	8,13	243,78
58,37	20,39	-8,40	0,02	15,30	9,49	7,42	222,54
42,19	17,02	-6,61	0,02	12,80	5,12	2,61	78,37
29,44	13,13	-5,37	0,02	10,00	4,00	1,28	38,33
19,62	8,80	-4,60	0,01	7,50	3,00	0,65	19,49
16,60	7,36	-4,38	0,01	6,10	1,77	0,29	8,57

MÉTODO DE MAKKINK

L(T)	T.Ambiente	Δ/Δ+γ	Radiación Extraterre	PET
2,48	8,00	0,52	6,50	0,77
2,48	8,00	0,52	7,60	0,91
2,48	8,00	0,52	7,30	0,88
2,48	9,00	0,54	11,00	1,39
2,48	8,00	0,52	7,20	0,86
2,48	8,00	0,52	7,30	0,88
2,48	8,00	0,52	8,00	0,97
2,48	7,00	0,51	8,30	0,98
2,48	7,00	0,51	7,40	0,86
2,48	7,00	0,51	7,80	0,91
2,48	7,00	0,51	8,40	0,99
2,48	7,00	0,51	8,60	1,01
2,48	7,00	0,51	9,10	1,08
2,48	6,00	0,49	9,30	1,07
2,48	6,00	0,49	9,70	1,12

. . . . .
. . . . .
. . . . .

PARA 365 DIAS

$$\frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \qquad ETP = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\left(c1\frac{R_s}{L}+c2\right)$$

ETP	Evapotranspiración makkink
Rs	Radiación solar incidente a nivel del suelo (mm/día)
C1	Coeficiente de Makkink
C2	Coeficiente de Makkink
Δ	Pendiente curva de saturación para temperatura media
γ	Constante psicrométrica

Qm	4,84
AT	177,83
ETP	1034,01

$$A_T = P_T * e^{-0,79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3,17 * 10^{-5}$$

AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE HARGREAVES

Ro (MJ*dia/m2)	Tmax	Tmin	Rs	ETO
6,5	14	3	1,42	0,62
7,6	14	2	1,74	0,76
7,3	14	3	1,60	0,70
11	14	3	2,41	1,05
7,2	14	3	1,58	0,69
7,3	14	3	1,60	0,70
8	14	2	1,83	0,80
8,3	14	2	1,90	0,83
7,4	14	1	1,76	0,77
7,8	14	1	1,86	0,81
8,4	14	1	2,00	0,88
8,6	14	1	2,05	0,90

. . . . .
. . . . .
. . . . .

PARA 365 DIAS

$$ET0 = 0,0135 \cdot (tmed + 17,78) \cdot Rs$$

ETO	Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)
Tmed	Temperatura media en ºC
Rs	Radiación solar incidente, convertida en mm/día

Qm	7,00
AT	257,37
ETO	735,07
kt	0,162

$$A_T = P_T * e^{-0,79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3,17 * 10^{-5}$$

AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

MÉTODO DE HARGREAVES SIMPLIFICADO

Tmax	Tmin	ETO
14	3	0,66
14	2	0,80
14	3	0,74
14	3	1,11
14	3	0,73
14	3	0,74
14	2	0,84
14	2	0,87
14	1	0,81

. . .
. . .
. . .

PARA 365 DIAS

$$ETO = 0,0023 \cdot (t_{med} + 17,78) \cdot R_0 \cdot \sqrt{(t_{máx} - t_{mín})}$$

ETO	Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)
Tmed	Temperatura media en ºC
Rs	Radiación solar extraterrestre en mm/día
tmáx	Temperatura diaria máxima
tmin	Temperatura diaria mínima
AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

$$A_T = P_T * e^{-0,79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3,17 * 10^{-5}$$

Qm	6,68
AT	245,56
ETO	773,05

MÉTODO DE PENNAN

$$ET_0 = c * (W * R_n + (1 - W) * f(u) * (e_a - e_d)$$

ETO	Evaporación de referencia en [mm/día]
W	Factor de ponderación relativo a la temperatura
Rn	Radiación neta [mm/día]
f(u)	Función relativa al viento medido a 2 metros
(ea-ed)	Diferencia entre la presión de vapor de saturación
c	Factor compensa el efecto condiciones climáticas

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \qquad \gamma = 0{,}671 \qquad \Delta = \frac{4098 * e_a}{(273{,}3 + T)^2}$$

γ	Constante psicrométrica (mbar/°C)
ea	Presión de vapor de saturación en mbar
Δ	Gradiente de la curva de presión de vapor de saturación (mbar/°C)
T	Temperatura media del aire en °C

$$f(u) = 0{,}27\left(1 + U_2 \frac{86{,}4}{100}\right) \qquad U_2 = 4{,}87 \frac{\left(U_z \frac{1000}{3600 * 24}\right)}{ln(67{,}8 * z - 5{,}42)}$$

U2	Velocidad del viento a 2 metros sobre el suelo en m/s
Uz	Velocidad del viento a z metros sobre el suelo, en km/día

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \qquad R_{nl} = \sigma(273{,}15 + T)^4 * (0{,}34 - 0{,}044 * \sqrt{e_d})(0{,}1 + 0{,}9 * \frac{n}{N})$$

$$A_T = P_T * e^{-0{,}79\frac{ETp}{P_T}}$$

$$Q_m = A_T * S * 3{,}17 * 10^{-5}$$

Rs	Radiación neta, diferencia entre ingresos y salidas de radiación de onda corta y larga (mm/día)
α	Corresponde al albedo o reflexión del agua y es un valor entre [0.05-0.07]
n	Horas de sol efectivas durante el día
N	Radiación de onda larga
Rnl	Radiación de onda larga
σ	Constante de Stefan Woltzman

AT	Escorrentía total anual en mm
Qm	Caudal medio anual en m^3/s

Δ	W	Ro	Rs	Rns	Rn	ETP
0,70	0,51	6,9	2,00	1,88	1,04	48,07
0,76	0,53	9	2,61	2,45	1,06	50,67
0,97	0,59	11,8	6,02	5,66	2,52	77,50
1,04	0,61	14,5	7,40	6,95	2,56	80,92
1,35	0,67	16,4	8,36	7,86	2,68	93,01
2,04	0,75	17,2	10,66	10,02	3,70	126,20
2,12	0,76	16,7	10,35	9,73	3,70	127,54
2,14	0,76	15,3	9,49	8,92	3,68	127,48
1,40	0,68	12,8	5,12	4,81	1,89	81,03
1,01	0,60	10	4,00	3,76	1,78	68,07
0,86	0,56	7,5	3,00	2,82	1,77	63,32
0,73	0,52	6,1	1,77	1,66	1,05	49,39

Qm	5,09
AT	187,04
ETO	993,21
h	323,00
U2	0,29
f(u)	0,34

Tabla 26. Tabla. Desarrollo individual y cálculo de cada método.

10.6 ANEXOS

La sección de anexos que encontramos en la herramienta de cálculo, son una serie de tablas que enumeraremos a continuación, las cuales son utilizadas por los métodos de cálculo de manera automatizada, dichas tablas son:

- Porcentaje de horas de luz para cada mes del año. Empleado por el método de Blaney-Criddle, Pennan.
- Duración máxima diaria de las horas del sol. Empleado por el método de Thornthwaite.

- Coeficiente kc para el cultivo de referencia. Empleado por el método de Blaney-Criddle.

- Tensión de vapor de saturación en función de la temperatura. Empleado por el método de Papadakis.

- Radiación extraterrestre expresada en vaporización equivalente. Empleado por el método de Jensen-Haise, Makkink, Hargreaves, Hargreaves simplificado y Pennan.

- Relación de $\Delta/\Delta+\gamma$ en función de la temperatura del aire. Empleado por el método de Makkink.

ANEXOS

PORCENTAJE HORAS-LUZ DIA PARA CADA MES DEL AÑO

LATITUD NORTE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	8,5	7,66	8,49	8,21	8,5	8,22	8,5	8,49	8,21	8,5	8,22	8,5
5	8,32	7,56	8,47	8,29	8,65	8,41	8,67	8,6	8,23	8,42	8,07	8,3
10	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,6	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,1
15	7,94	7,36	8,43	8,44	8,98	8,8	9,05	8,83	8,28	8,2	7,75	7,88
16	7,93	7,35	8,44	8,46	9,07	8,83	9,07	8,85	8,27	8,24	7,72	7,83
17	7,86	7,32	8,43	8,48	9,04	8,87	9,11	8,87	8,27	8,22	7,69	7,8
18	7,83	7,3	8,42	8,5	9,09	8,92	9,16	8,9	8,27	8,21	7,66	7,74
19	7,79	7,28	8,41	8,51	9,11	8,97	9,2	8,92	8,28	8,19	7,63	7,71
20	7,74	7,25	8,41	8,52	9,15	9	9,25	8,96	8,3	8,18	7,58	7,66
21	7,71	7,24	8,4	8,54	9,18	9,05	9,29	8,98	8,29	8,15	7,54	7,62
22	7,66	7,21	8,4	8,56	9,22	9,09	9,33	9	8,3	8,13	7,5	7,55
23	7,62	7,19	8,4	8,57	9,24	9,12	9,35	9,02	8,3	8,11	7,47	7,5
24	7,58	7,17	8,4	8,6	9,3	9,2	9,41	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
25	7,53	7,14	8,39	8,61	9,33	9,23	9,45	9,09	8,32	8,09	7,4	7,42
26	7,49	7,12	8,4	8,64	9,38	9,3	9,49	9,1	8,31	8,06	7,36	7,31
27	7,43	7,09	8,38	8,65	9,4	9,32	9,52	9,13	8,32	8,03	7,36	7,31
28	7,4	7,07	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
29	7,35	7,04	8,37	8,7	9,49	9,43	9,61	9,19	8,32	8	7,24	7,2
30	7,3	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,33	7,99	7,19	7,15
31	7,25	7	8,36	8,73	9,57	9,54	9,72	9,24	8,33	7,95	7,15	7,09
32	7,2	6,97	8,37	8,76	9,62	9,59	9,77	9,27	8,34	7,95	7,11	7,05
33	7,15	6,94	8,36	8,78	9,68	9,65	9,82	9,31	8,35	7,94	7,07	6,98
34	7,1	6,91	8,36	8,8	9,72	9,7	9,88	9,33	8,36	7,9	7,02	6,92
35	7,05	6,88	8,35	8,83	9,77	9,76	9,94	9,37	8,37	7,88	6,97	6,85
36	6,99	6,85	8,35	8,85	9,82	9,82	9,09	9,4	8,37	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66
40	6,76	6,72	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,39	7,75	6,72	7,52
42	6,63	6,65	8,31	9	10,14	10,22	10,35	9,62	8,4	7,69	6,62	6,37
44	6,49	6,58	8,3	9,06	10,26	10,38	10,49	9,7	8,41	7,63	6,49	6,21
46	6,34	6,5	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,57	6,36	6,04
48	6,17	6,41	8,27	9,18	10,53	10,71	10,8	9,89	8,44	7,51	6,23	5,86
50	5,98	6,3	8,24	9,24	10,68	19,91	10,9	10	8,46	7,45	6,1	5,65
52	5,77	6,19	8,21	9,29	10,85	11,13	11,2	10,12	8,49	7,39	5,93	5,43
54	5,55	6,08	8,18	9,36	11,03	11,38	11,43	10,26	8,51	7,3	5,74	5,18
56	5,3	5,95	8,15	9,45	11,22	11,67	11,69	10,4	8,52	7,21	5,54	4,89
58	5,01	5,81	8,12	9,55	11,46	12	11,98	10,55	8,51	7,1	4,31	4,56
60	4,67	5,65	8,08	9,65	11,74	12,39	12,31	10,7	8,51	6,98	5,04	4,22

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DEL SOL

LATITUD NORTE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
5	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
10	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
16	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
17	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
18	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
19	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
20	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
21	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
22	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
23	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	0,6
24	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	0,6
25	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	0,6
26	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	0,6
27	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	0,6
28	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
29	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
30	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
31	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
32	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
33	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
34	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
35	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
36	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
38	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3
40	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3
42	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,9	11,1	9,8	9,1
44	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14	12,6	11	9,7	8,9
46	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
48	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
50	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
52	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
54	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
56	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
58	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3
60	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,5	8,3

COEFICIENTE PARA EL CULTIVO KC

olivo	0,5	0,5	0,65	0,6	0,55	0,05	0,45	0,45	0,55	0,6	0,65	0,5
aguacate	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
alfalfa	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
algodón	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
arroz	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
cacahuete	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
cacao	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
café	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
caña de azuc	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
trigo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
cítricos	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
espárrago	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
fresa	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
garbanzo	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
girasol	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
hortalizas	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
lechuga	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
maiz	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
melón	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
plátano	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
sandía	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
tomate	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

TENSIÓN DE VAPOR DE SATURACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-7	3,62	3,59	3,56	3,53	3,51	3,48	3,45	3,43	3,4	3,37
-6	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,7	3,67	3,65
-5	4,22	4,19	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4	3,97	3,94
-4	4,55	4,51	4,48	4,45	4,41	4,38	4,35	4,31	4,28	4,25
-3	4,9	4,87	4,83	4,79	4,76	4,72	4,69	4,65	4,62	4,58
-2	5,28	5,24	5,2	5,17	5,13	5,09	5,05	5,01	4,98	4,94
-1	5,69	5,64	5,6	5,56	5,52	5,48	5,44	5,4	5,36	5,32
0	6,12	6,07	6,03	5,98	5,94	5,9	5,86	5,81	5,77	5,73
0	6,12	6,16	6,21	6,25	6,3	6,34	6,39	6,44	6,48	6,53
1	6,58	6,62	6,67	6,72	6,77	6,82	6,87	6,92	6,97	7,02
2	7,07	7,12	7,17	7,22	7,27	7,32	7,38	7,43	7,48	7,54
3	7,59	7,64	7,7	7,75	7,81	7,86	7,92	7,97	8,03	8,09
4	8,14	8,2	8,26	8,32	8,38	8,44	8,49	8,55	8,61	8,67
5	8,74	8,8	8,86	8,92	8,98	9,04	9,11	9,17	9,23	9,3
6	9,36	9,43	9,49	9,56	9,63	9,69	9,76	9,83	9,89	9,96
7	10,03	10,1	10,17	10,24	19,31	10,38	10,45	10,52	10,6	10,67
8	10,74	10,81	10,89	10,96	11,04	11,11	11,19	11,26	11,34	11,42
9	11,49	11,57	11,65	11,73	11,81	11,89	11,97	12,05	12,13	12,21
10	12,49	12,37	12,46	12,54	12,62	12,71	12,79	12,88	12,97	13,05
11	13,14	13,23	13,31	13,4	13,49	13,58	13,67	13,76	13,85	13,94
12	14,04	14,13	14,22	14,32	14,41	14,51	14,6	14,7	14,79	14,89
13	14,99	15,09	15,18	15,28	15,38	15,48	15,59	15,69	15,79	15,89
14	15,99	16,1	16,2	16,31	16,41	16,52	16,63	16,73	16,84	16,95
15	17,06	17,17	17,28	17,39	17,5	17,62	17,73	17,84	17,96	18,07
16	18,19	18,31	18,42	18,54	18,66	18,78	18,9	19,02	19,14	19,26
17	19,38	19,5	19,63	19,75	19,88	20	20,13	20,26	20,38	20,51
18	20,64	20,77	20,9	31,03	21,17	21,3	21,43	21,57	21,7	21,84
19	21,97	22,11	22,25	22,39	22,53	22,67	22,81	22,95	23,09	23,24
20	23,38	23,53	23,67	23,82	23,97	24,11	24,26	24,41	24,56	24,71
21	24,87	25,02	25,17	25,33	25,48	25,64	28,8	25,95	26,11	26,27
22	26,43	26,59	26,76	26,92	27,08	27,25	27,41	27,58	27,75	27,92
23	28,09	28,26	28,43	28,6	28,77	28,95	29,12	29,3	29,47	29,65
24	29,83	30,01	30,19	30,37	30,55	30,73	30,92	31,1	31,29	31,48
25	31,66	31,85	32,04	32,23	32,43	32,62	32,81	33,01	33,2	33,4
26	33,6	33,8	34	34,2	34,4	34,6	34,81	35,01	35,22	35,43
27	35,64	35,85	36,06	36,27	36,48	36,7	36,91	37,13	37,34	37,56
28	37,78	38	38,22	38,45	38,67	38,9	39,12	39,35	39,58	39,81
29	40,04	40,27	40,5	40,74	40,97	41,21	41,45	41,69	41,93	42,17
30	42,41	42,66	42,9	43,15	43,4	43,65	43,9	44,15	44,4	44,65
31	44,91	45,17	45,42	45,68	45,94	46,2	46,47	46,73	47	47,26
32	47,53	47,8	48,07	48,35	48,62	48,89	49,17	49,45	49,73	50,01
33	50,29	50,57	50,86	51,14	51,43	51,72	52,01	52,3	52,6	52,89
34	53,19	53,48	53,78	54,08	54,39	54,69	54,99	55,3	55,61	55,92
35	56,23	56,54	56,85	57,17	57,49	57,81	58,13	58,45	58,77	59,09
36	59,42	49,75	60,08	60,41	60,74	61,08	61,41	61,75	62,09	62,43
37	62,77	63,12	63,46	63,81	64,16	64,51	64,86	65,21	65,57	65,93
38	66,29	66,65	67,01	67,37	67,74	68,11	68,48	68,85	69,22	69,59
39	29,97	70,35	70,73	71,11	71,49	71,88	72,27	72,66	73,05	73,44
40	73,83	74,23	74,63	75,03	75,43	75,84	76,24	76,65	77,06	77,47
41	77,88	78,3	78,72	79,14	79,56	79,98	80,4	80,83	81,26	81,69

RADIACCIÓN EXTRATERRESTRE EXPRESADA EN VAPORIZACIÓN EQUIVALENTE (mm/día)

LATITUD	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
50	3,8	6,1	9,4	12,7	15,8	17,1	16,4	14,1	10,9	7,4	4,5	3,2
48	4,3	6,6	9,8	13	15,9	17,2	16,5	14,3	11,2	7,8	5	3,7
46	4,9	7,1	10,2	13,3	16	17,2	16,6	14,5	11,5	8,3	5,5	4,3
44	5,3	7,6	10,6	13,7	16,1	17,2	16,6	14,7	11,9	8,7	6	4,7
42	5,9	8,1	11	14	16,2	17,3	16,7	15	12,2	9,1	6,5	5,2
40	6,4	8,6	11,4	14,3	16,4	17,3	16,7	15,2	12,5	9,6	7	5,7
38	6,9	9	11,8	14,5	16,4	17,2	16,7	15,3	12,8	10	7,5	6,1
36	7,4	9,4	12,1	14,7	16,4	17,2	16,7	15,4	13,1	10,6	8	6,6
34	7,9	9,8	12,4	14,8	16,5	17,1	16,8	15,5	13,4	10,8	8,5	7,2
32	8,3	10,2	12,8	15	16,5	17	16,8	15,6	13,6	11,2	9	7,8
30	8,8	10,7	13,1	15,2	16,5	17	16,8	15,7	13,9	11,6	9,5	8,3
28	9,3	11,1	13,4	15,3	16,5	16,8	16,7	15,7	14,1	12	9,9	8,8
26	9,8	11,5	13,7	15,3	16,4	16,7	16,6	15,7	14,3	12,3	10,3	9,3
24	10,2	11,9	13,9	15,4	16,4	16,6	16,5	15,8	14,5	12,6	10,7	9,7
22	10,7	12,3	14,2	15,5	16,3	16,4	16,4	15,8	14,6	13	11,1	10,2
20	11,2	12,7	14,4	15,6	16,3	16,4	16,3	15,9	14,8	13,3	11,6	10,7
18	11,6	13	14,6	15,6	16,1	16,1	16,1	15,8	14,9	13,6	12	11,1
16	12	13,3	14,7	15,6	16	15,9	15,9	15,7	15	13,9	12,4	11,6
14	12,4	13,6	14,9	15,7	15,8	15,7	15,7	15,7	15,1	14,1	12,8	12
12	12,8	13,9	15,1	15,7	15,7	15,5	15,5	15,6	15,2	14,4	13,3	12,5
10	13,2	14,2	15,3	15,7	15,5	15,3	15,3	15,5	15,3	14,7	13,6	12,9
8	13,6	14,5	15,3	15,6	15,3	15	15,1	15,4	15,3	14,8	13,9	13,3
6	13,9	14,8	15,4	15,4	15,1	14,7	14,9	15,2	15,3	15	14,2	13,7
4	14,3	15	15,5	15,5	14,9	14,4	14,6	15,1	15,3	15,1	14,5	14,1
2	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
0	15	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

RELACIÓN Δ/Δ+γ EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AIRE (t)

t	Δ/Δ+γ	t	Δ/Δ+γ	t	Δ/Δ+γ	t	Δ/Δ+γ
0	0,401	10	0,552	20	0,682	30	0,78
0,1	0,401	10,1	0,552	20,1	0,682	30,1	0,78
0,2	0,401	10,2	0,552	20,2	0,682	30,2	0,78
0,3	0,409	10,3	0,559	20,3	0,688		
0,4	0,409	10,4	0,559	20,4	0,688		
0,5	0,409	10,5	0,559	20,5	0,688		
0,6	0,409	10,6	0,559	20,6	0,688		
0,7	0,409	10,7	0,559	20,7	0,688		
0,8	0,4158	10,8	0,566	20,8	0,684		
0,9	0,4158	10,9	0,566	20,9	0,684		
1	0,4158	11	0,566	21	0,684		
1,1	0,4158	11,1	0,566	21,1	0,684		
1,2	0,4158	11,2	0,566	21,2	0,684		
1,3	0,426	11,3	0,573	21,3	0,699		
1,4	0,426	11,4	0,573	21,4	0,699		
1,5	0,426	11,5	0,573	21,5	0,699		
1,6	0,426	11,6	0,573	21,6	0,699		
1,7	0,426	11,7	0,573	21,7	0,699		
1,8	0,432	11,8	0,58	21,8	0,705		
1,9	0,432	11,9	0,58	21,9	0,705		
2	0,432	12	0,58	22	0,705		
2,1	0,432	12,1	0,58	22,1	0,705		
2,2	0,432	12,2	0,58	22,2	0,705		

2,3	0,44	12,3	0,587	22,3	0,71
2,4	0,44	12,4	0,587	22,4	0,71
2,5	0,44	12,5	0,587	22,5	0,71
2,6	0,44	12,6	0,587	22,6	0,71
2,7	0,44	12,7	0,587	22,7	0,71
2,8	0,448	12,8	0,593	22,8	0,715
2,9	0,448	12,9	0,593	22,9	0,715
3	0,448	13	0,593	23	0,715
3,1	0,448	13,1	0,593	23,1	0,715
3,2	0,448	13,2	0,593	23,2	0,715
3,3	0,445	13,3	0,6	23,3	0,72
3,4	0,445	13,4	0,6	23,4	0,72
3,5	0,445	13,5	0,6	23,5	0,72
3,6	0,445	13,6	0,6	23,6	0,72
3,7	0,445	13,7	0,6	23,7	0,72
3,8	0,462	13,8	0,607	23,8	0,725
3,9	0,462	13,9	0,607	23,9	0,725
4	0,462	14	0,607	24	0,725
4,1	0,462	14,1	0,607	24,1	0,725
4,2	0,462	14,2	0,607	24,2	0,725
4,3	0,47	14,3	0,614	24,3	0,73
4,4	0,47	14,4	0,614	24,4	0,73
4,5	0,47	14,5	0,614	24,5	0,73
4,6	0,47	14,6	0,614	24,6	0,73
4,7	0,47	14,7	0,614	24,7	0,73
4,8	0,478	14,8	0,621	24,8	0,735
4,9	0,478	14,9	0,621	24,9	0,735
5	0,478	15	0,621	25	0,735
5,1	0,478	15,1	0,621	25,1	0,735
5,2	0,478	15,2	0,621	25,2	0,735
5,3	0,485	15,3	0,627	25,3	0,74
5,4	0,485	15,4	0,627	25,4	0,74
5,5	0,485	15,5	0,627	25,5	0,74
5,6	0,485	15,6	0,627	25,6	0,74
5,7	0,485	15,7	0,627	25,7	0,74
5,8	0,493	15,8	0,633	25,8	0,745
5,9	0,493	15,9	0,633	25,9	0,745
6	0,493	16	0,633	26	0,745
6,1	0,493	16,1	0,633	26,1	0,745
6,2	0,493	16,2	0,633	26,2	0,745
6,3	0,5	16,3	0,64	26,3	0,75
6,4	0,5	16,4	0,64	26,4	0,75
6,5	0,5	16,5	0,64	26,5	0,75
6,6	0,5	16,6	0,64	26,6	0,75
6,7	0,5	16,7	0,64	26,7	0,75
6,8	0,508	16,8	0,646	26,8	0,755

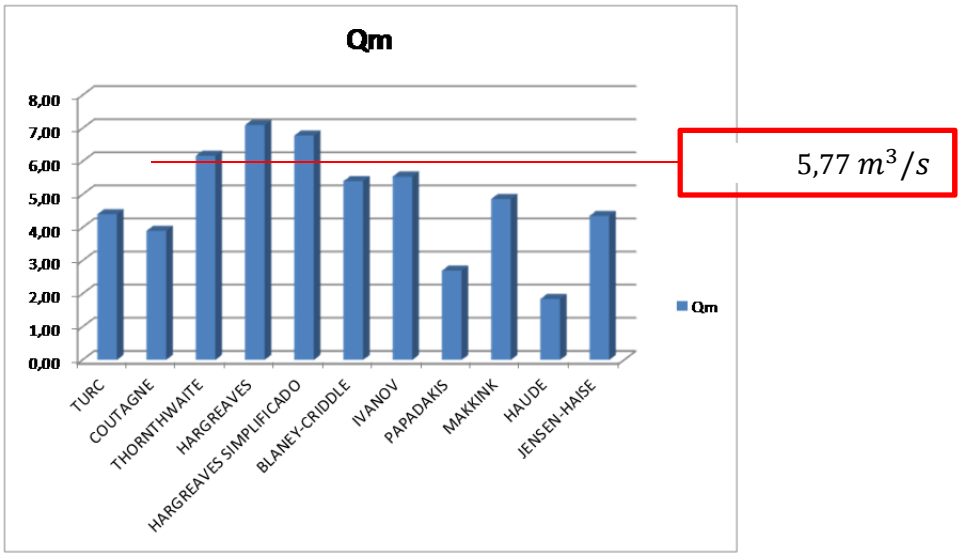
6,9	0,508	16,9	0,646	26,9	0,755
7	0,508	17	0,646	27	0,755
7,1	0,508	17,1	0,646	27,1	0,755
7,2	0,508	17,2	0,646	27,2	0,755
7,3	0,515	17,3	0,652	27,3	0,76
7,4	0,515	17,4	0,652	27,4	0,76
7,5	0,515	17,5	0,652	27,5	0,76
7,6	0,515	17,6	0,652	27,6	0,76
7,7	0,515	17,7	0,652	27,7	0,76
7,8	0,522	17,8	0,658	27,8	0,764
7,9	0,522	17,9	0,658	27,9	0,764
8	0,522	18	0,658	28	0,764
8,1	0,522	18,1	0,658	28,1	0,764
8,2	0,522	18,2	0,658	28,2	0,764
8,3	0,53	18,3	0,664	28,3	0,768
8,4	0,53	18,4	0,664	28,4	0,768
8,5	0,53	18,5	0,664	28,5	0,768
8,6	0,53	18,6	0,664	28,6	0,768
8,7	0,53	18,7	0,664	28,7	0,768
8,8	0,537	18,8	0,67	28,8	0,772
8,9	0,537	18,9	0,67	28,9	0,772
9	0,537	19	0,67	29	0,772
9,1	0,537	19,1	0,67	29,1	0,772
9,2	0,537	19,2	0,67	29,2	0,772
9,3	0,544	19,3	0,676	29,3	0,776
9,4	0,544	19,4	0,676	29,4	0,776
9,5	0,544	19,5	0,676	29,5	0,776
9,6	0,544	19,6	0,676	29,6	0,776
9,7	0,544	19,7	0,676	29,7	0,776
9,8	0,552	19,8	0,682	29,8	0,78
9,9	0,552	19,9	0,682	29,9	0,78

Tabla 27. Tabla. Anexos herramienta de cálculo.

10.7 RESUMEN

En este apartado de nuestra herramienta de cálculo se presenta el resumen con los resultados de caudal según cada uno de los métodos aplicados, junto a una gráfica para apreciar la variación entre los métodos y el caudal recomendable a seleccionar.

CAUDAL MEDIO ANUAL m^3/s	
TURC	4,40
COUTAGNE	3,90
THORNTHWAITE	6,17
HARGREAVES	7,10
HARGREAVES SIMPLIFICADO	6,78
BLANEY-CRIDDLE	5,40
IVANOV	5,54
PAPADAKIS	2,69
MAKKINK	4,86
HAUDE	1,84
JENSEN-HAISE	4,35
PENNAN	5,09



Una vez obtenido el caudal medio anual para todos los métodos, nuestra herramienta de cálculo nos propone un caudal recomendable, partiendo de una serie de suposiciones que se muestran en la siguiente imagen y como podemos observar nuestra herramienta nos proporciona un caudal recomendable de 5,83 m^3/s que comparándolo con el caudal real de dicha central minihidráulica el cual ha sido obtenido a través del estudio de rehabilitación de la Universidad de Jaén, el cual tiene un valor de 5,54 m^3/s. Tendremos que nuestro caudal recomendable tiene un error de 1,03 %, que como veremos a continuación es más preciso que el método que más se acerca.

RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

1. Calculamos el caudal medio para todos los métodos de calculo de caudal medio anual.
2. Sacamos el porcentaje de error de todos los métodos entorno al caudal medio calculado.
3. Descartamos los métodos que excedan del 20% de error.
4. Calculamos el caudal medio con los caudales de los métodos seleccionados.
5. Ya tenemos un caudal medio anual en el que aseguramos una precisión descartando para el cálculo los métodos que han dado resultados alejados del resto.

		%ERROR	
TURC	4,40	9,15	9,15
COUTAGNE	3,90	19,46	19,46
THORNTHWAITE	6,17	27,38	0,00
HARGREAVES	7,10	46,54	0,00
HARGREAVES SIMPLIFICADO	6,78	39,91	0,00
BLANEY-CRIDDLE	5,40	11,49	11,49
IVANOV	5,54	14,39	14,39
PAPADAKIS	2,69	44,38	0,00
MAKKINK	4,86	0,38	0,38
HAUDE	1,84	62,07	0,00
JENSEN-HAISE	4,35	10,08	10,08
PENNAN	5,09	5,04	5,04
CAUDAL MEDIO	4,84		5,83

CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE

5,83

El caudal real de nuestra central tomada para el estudio es de 5,77 m^3/s, comparándolo con los resultados obtenidos en nuestra herramienta tenemos los siguientes porcentajes de error para cada método, y el caudal a seleccionar según nuestra herramienta sería el del método de Ivanov con un caudal de 5, 54 m^3/s, con tan solo un error del 3,99 %.

Caudal real =5,77 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	4,40	23,75
COUTAGNE	3,90	32,40
THORNTHWAITE	17,37	-201,12
HARGREAVES	17,33	-200,39
HARGREAVES SIMPLIFICADO	17,33	-200,36
BLANEY-CRIDDLE	17,37	-201,12
IVANOV	5,54	3,99
PAPADAKIS	2,69	53,32
MAKKINK	17,71	-207,00
HAUDE	1,84	68,16
JENSEN-HAISE	4,35	24,53
PENNAN	5,09	11,84

Tabla 86. Caudales calculados para *Central Purísima Concepción.*

CAPÍTULO 11

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA SU VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN

ÍNDICE

Aplicación de la metodología. Validación **165**
Central Casas Nuevas. Marmolejo **166**
Central nuestra señora de los Ángeles. Campillo de Arenas **171**
Central Valdepeñas. Valdepeñas de Jaén **176**
Central Río Frío. Los Villares **181**
Central Purísima Concepción. Mengíbar **186**
Central Puente del Obispo. Begíjar **191**
Central Santa Isabel. Torres **196**
Central Mata Begid. Cambil **201**
Central San Cayetano. Arbuniel **206**
Central Junta de los Ríos. Cambil **211**
Central San Manuel. Cambil **216**
Central Electra Guzmán. Cambil **221**
Central Nuestra Señora de Tiscar. Quesada **226**
Central Cerrada de Utrero. Cazorla **231**
Central Las Chozuelas. Villanueva del Arzobispo **236**
Central La Toba. Santiago-Pontones **241**
Central Trujala. Segura de la Sierra **246**
Central Electra San Juan. Puente Génave **251**

11. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN

Este capítulo es el capítulo más extenso del proyecto y sin ser el más importante se hace necesario para comprobar la eficacia de la herramienta y cálculo y ayudarnos a proponer que métodos según las circunstancias son más precisos. Se analizaran centrales de la provincia de Jaén, de las cuales las imágenes, caudales y detalles técnicos de las centrales nos las ha proporcionado informes de la agencia andaluza de la energía, en su página dispone de un mapa en el que podemos seleccionar centrales mini hidráulicas y nos da breves informes de una dos o tres páginas con algún plano de situación, imágenes, datos de turbina, caudal, potencia, salto neto, y algunos más que no se han utilizado, no todos los datos necesarios nos son proporcionados, datos como humedad, precipitaciones, radiación, superficie, entre otros han sido necesarios sacarlos de otras partes, como se describe en el capítulo de obtención de datos.

La estructura de cada epígrafe de este capítulo queda estructurada de la siguiente forma:

- Situación y descripción de la central.
- Aplicación de la metodología y obtención del caudal medio anual.
- Comparación de resultados.

El procedimiento de aplicación de la metodología de cálculo es el mismo en todos los casos, luego se explica antes del estudio y a continuación solo se mostraran los datos de partida junto a los obtenidos:

La recopilación de datos para el cálculo del caudal se realiza como se resume en el capítulo 8. Una vez recopilados los datos procedemos a utilizar nuestra ´´Herramienta de cálculo de caudal para tramos no aforados`` tal y como se describe en el capítulo 9.

Abrimos nuestra herramienta de cálculo, pasamos a la ventana insertar datos de cálculo e insertamos los siguientes datos:

I. Los datos de temperatura media anual, temperatura media diaria, temperatura media mensual, temperatura máxima media, temperatura mínima media, temperatura ambiente máxima diaria, temperatura ambiente mínima diaria y radiación solar extraterrestre se obtienen en el SIG "Radiación Solar en Andalucía".

II. La radiación extraterrestre también se obtiene a través de la tabla ´´Radiación extraterrestre para el hemisferio Norte expresada en evaporación equivalente (mm/día) (Doorenbos y Pruit, 1977)``.

III. El número máximo de horas de sol se encuentra en la tabla que se adjunta en el apartado de ´´ANEXOS`` del capítulo de ´´DESARROLLO EN EXCEL DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO.

IV. Porcentaje horas de sol según latitud, se muestra la tabla en el método de Blaney-Criddle, apartado 9.2.7.

V. Valores mensuales de kg, coeficiente global de desarrollo del cultivo de referencia, se obtiene de la tabla de coeficientes mostrada en el método de Blaney-Criddle, apartado 9.2.7.

VI. La humedad media del aire y velocidad del viento, se encuentran en la agencia estatal de meteorología (AEMET). También hay un SIG de humedad de la Junta de Andalucía.

VII. La precipitación anual en la cuenca se obtiene en el SIG "S.A.I.H. del Guadalquivir".

VIII. Latitud y altura sobre el nivel de mar, sacados de google earth.

IX. La superficie de la cuenca de captación se traza y se mide en el SIG "REDIAM".

11.1 CENTRAL CASAS NUEVAS. MARMOLEJO

Fig. 53. Central Casas Nuevas.

11.1.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Marmolejo, coordenadas UTM (Huso 30): 393.387, 4.209.242. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

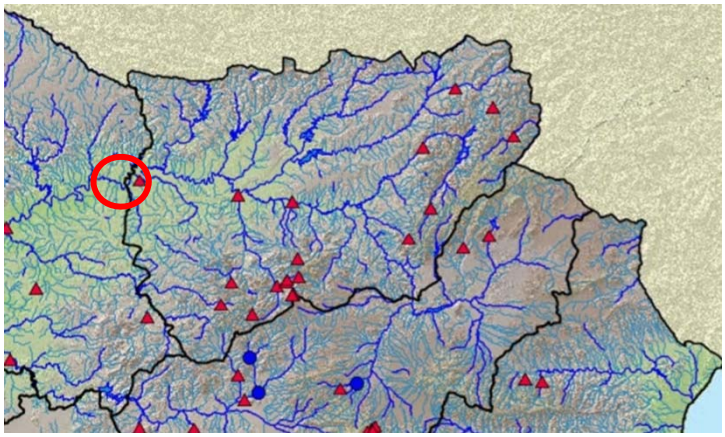


Fig. 54. Situación Central Casas Nuevas.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalquivir.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 6,5.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 56,58.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.960 - 1.994.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 40.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 10.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Kaplan - Generador síncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 2.200.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 16.810,738.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 6.135,92.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

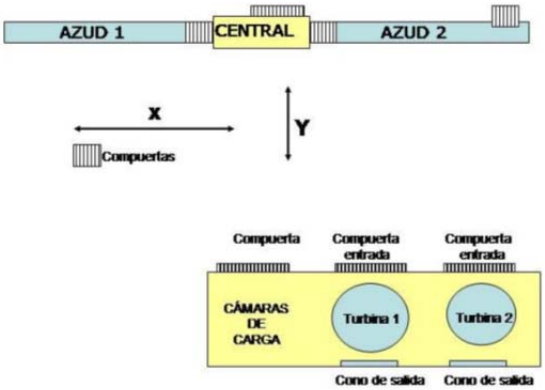


Fig. 55. Esquema Central Casas Nuevas.

Superficie de la Cuenca de Captación: 7196 km^2.

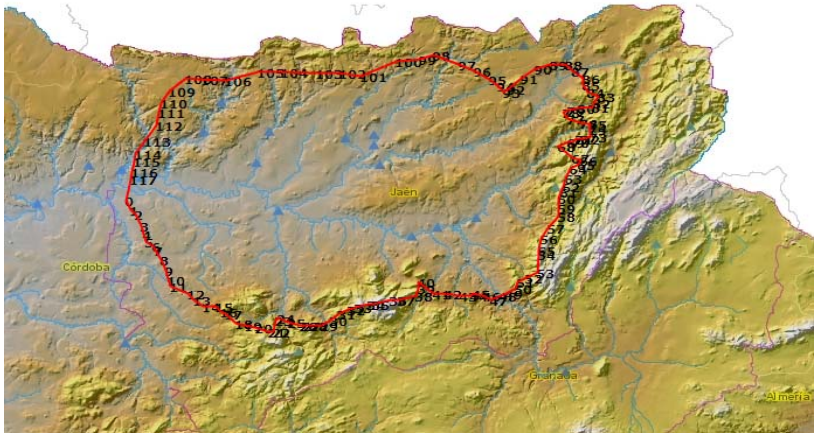


Fig. 56. Cuenca de Captación de la Central Casas Nuevas.

11.1.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

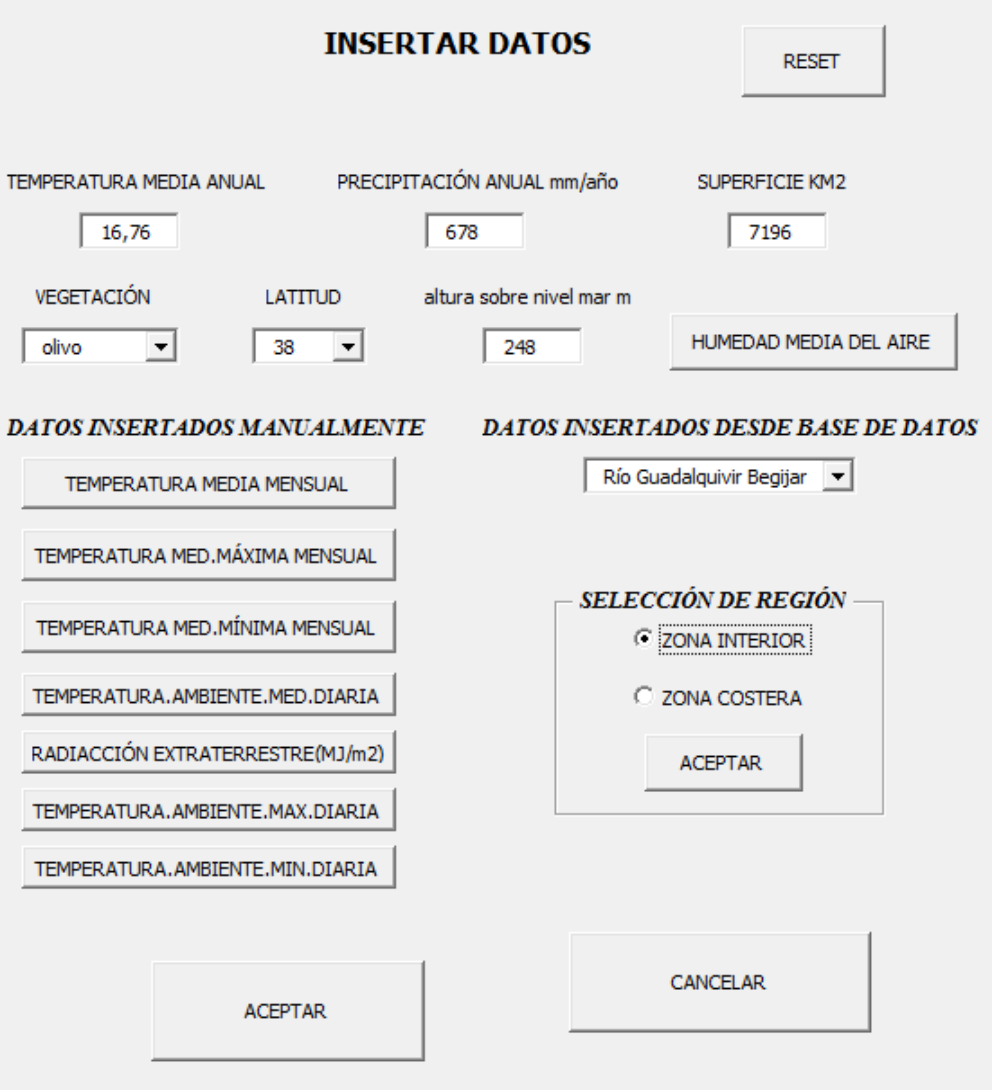


Fig. 57. Panel. Inserción datos 3.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	16,76
precipitación anual (mm/año)	678
superficie (km2)	7196
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
8,06451613	9,21428571	13,4516129	15,3	19,3548387	25	25,8387097	25,8709677	21,9666667	16,7096774	11,4	9

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
14,4516129	16,82142857	20,4193548	22,63333333	27,38709677	34,1666667	35,22580645	35,64516129	30,83333333	24,19354839	17,6	15,22580645

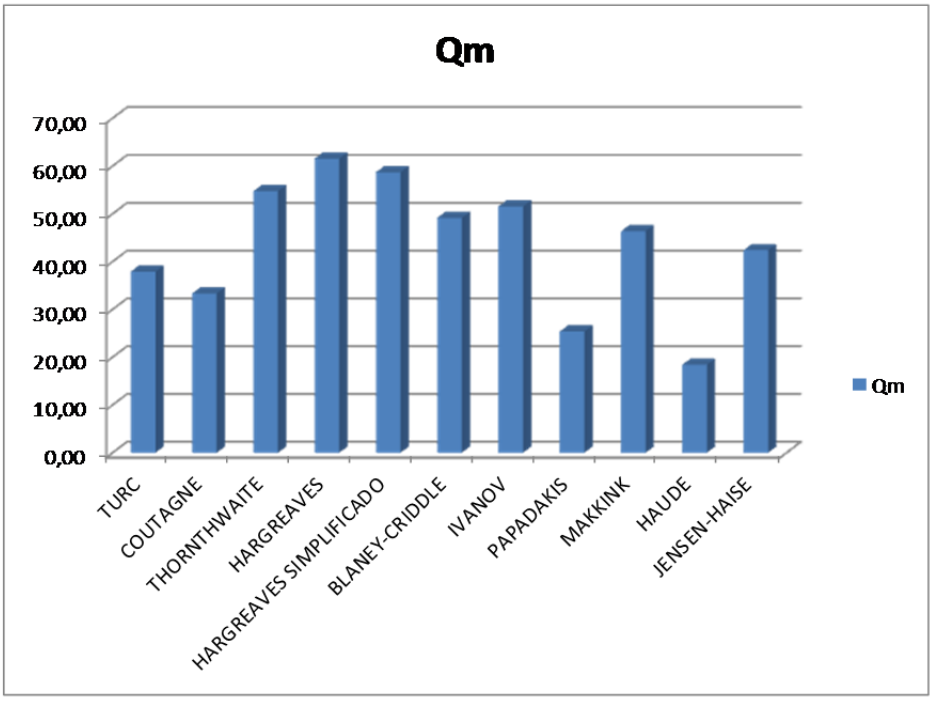
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,80645161	2,678571429	7,64516129	8,2	10,93548387	15,0666667	15,61290323	16,06451613	13,66666667	10,4516129	5,866666667	4,064516129

Tabla 28. Datos iniciales de partida Central de Casas Nuevas.

Los resultados obtenidos de los caudales medios anuales se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	37,93
COUTAGNE	33,33
THORNTHWAITE	54,73
HARGREAVES	61,55
HARGREAVES SIMPLIFICADO	58,69
BLANEY-CRIDDLE	49,15
IVANOV	51,54
PAPADAKIS	25,37
MAKKINK	46,36
HAUDE	18,41
JENSEN-HAISE	42,39
PENNAN	47,85



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**46,26**

Tabla 29. Tabla resumen caudales en la Central de Casas Nuevas.

11.1.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 56,58 m³/s		
Método	Caudal medio (m³/s)	Error (%)
TURC	37,93	32,96
COUTAGNE	33,33	41,10
THORNTHWAITE	54,73	3,27
HARGREAVES	61,55	-8,79
HARGREAVES SIMPLIFICADO	58,69	-3,73
BLANEY-CRIDDLE	49,15	13,13
IVANOV	51,54	8,90
PAPADAKIS	25,37	55,17
MAKKINK	46,36	18,06
HAUDE	18,41	67,46
JENSEN-HAISE	42,39	25,07
PENNAN	47,85	15,44

Tabla 30. Comparación de Resultados de Caudal de la Central de Casas Nuevas.

Se puede observar cómo los métodos de Thornthwaite, Hargreaves, Hargreaves simplificado e Ivanov ofrecen un resultado muy próximo al real. Métodos como Turc, Coutagne, Papadakis o Haude conllevan un error considerable, superior al 30%.

11.2 CENTRAL NUESTRA SEÑORA DE LOS ÁNGELES. CAMPILLO DE ARENAS

Fig. 58. Central Nuestra Señora de los Ángeles.

11.2.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Campillo de Arenas, coordenadas UTM (Huso 30): 437.048 , 4.157.210. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

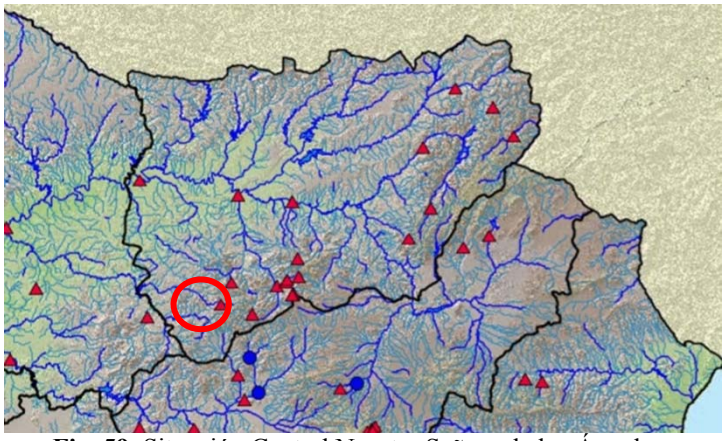


Fig. 59. Situación Central Nuestra Señora de los Ángeles.

El río que fluye por su cuenca es el Río Valdearazo.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 30.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,23.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.972 - 1.997.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,15.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,022.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Banki - Generador síncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 30.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 157,18.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 57,37.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

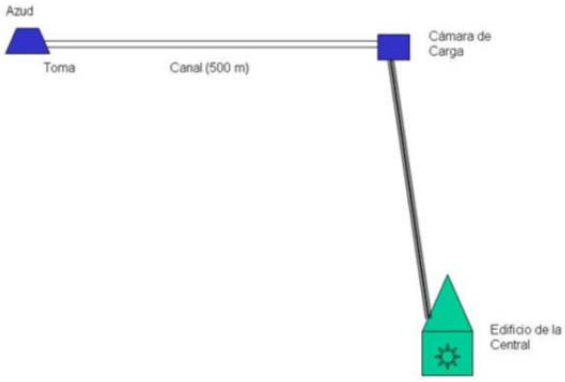


Fig. 60. Esquema Central Nuestra Señora de los Ángeles.

Superficie de la Cuenca de Captación: 39,6 km^2.

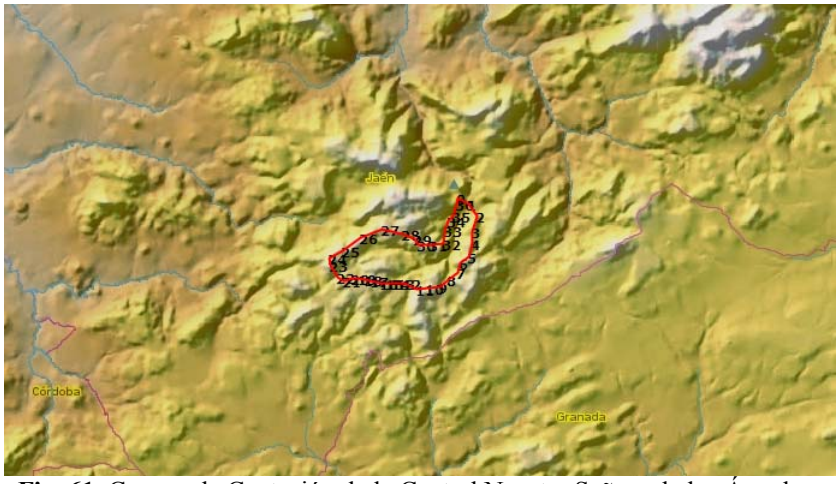


Fig. 61. Cuenca de Captación de la Central Nuestra Señora de los Ángeles.

11.2.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

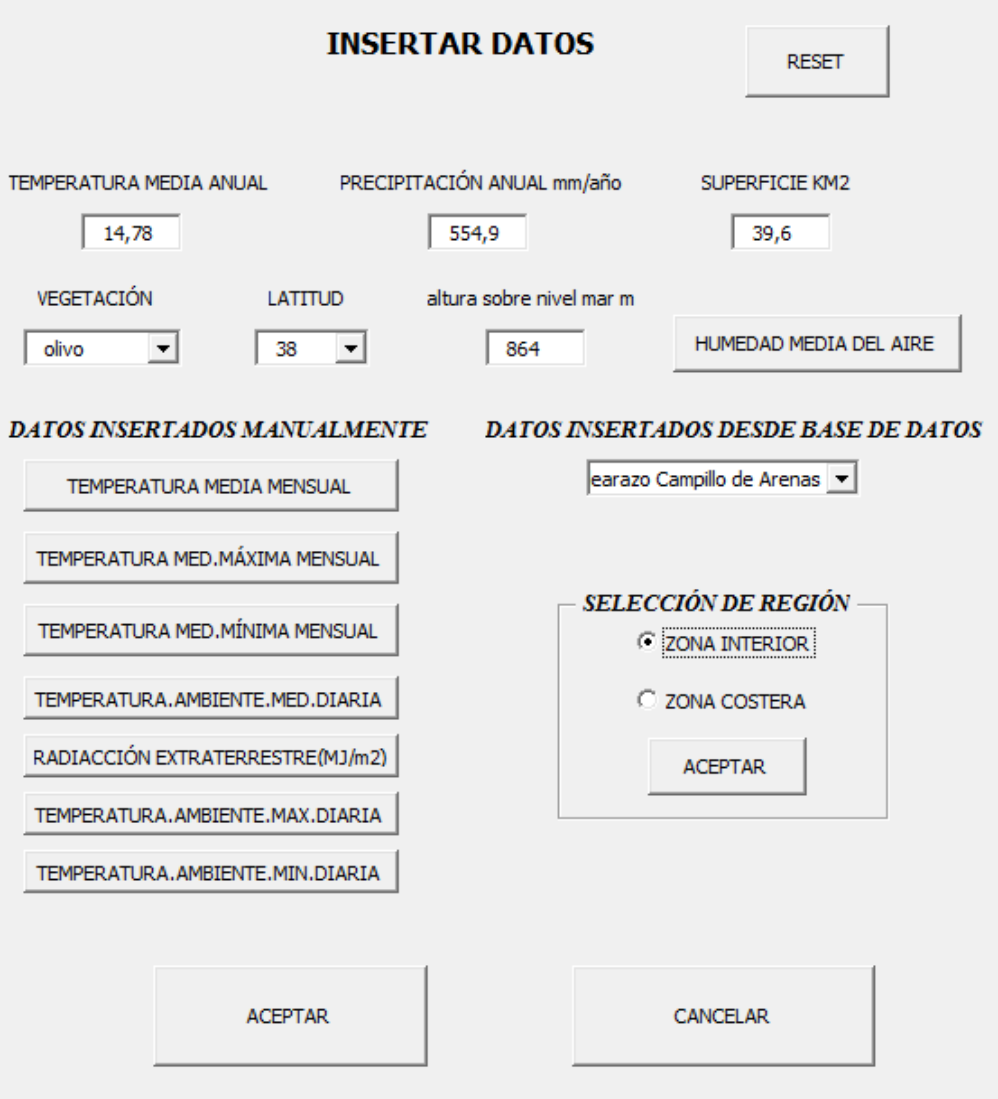


Fig. 62. Panel. Inserción datos 4

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,78
precipitación anual (mm/año)	554,9
superficie (km2)	39,6
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,548	9,036	12,32	13,9	18,1	24,93	26,23	26	21,63	16,06	10,57	8,194

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
14,2258065	16,35714286	19,3870968	21,5	26	34,0666667	35,4516129	35,25806452	30,26666667	23,48387097	16,73333333	14,5483871

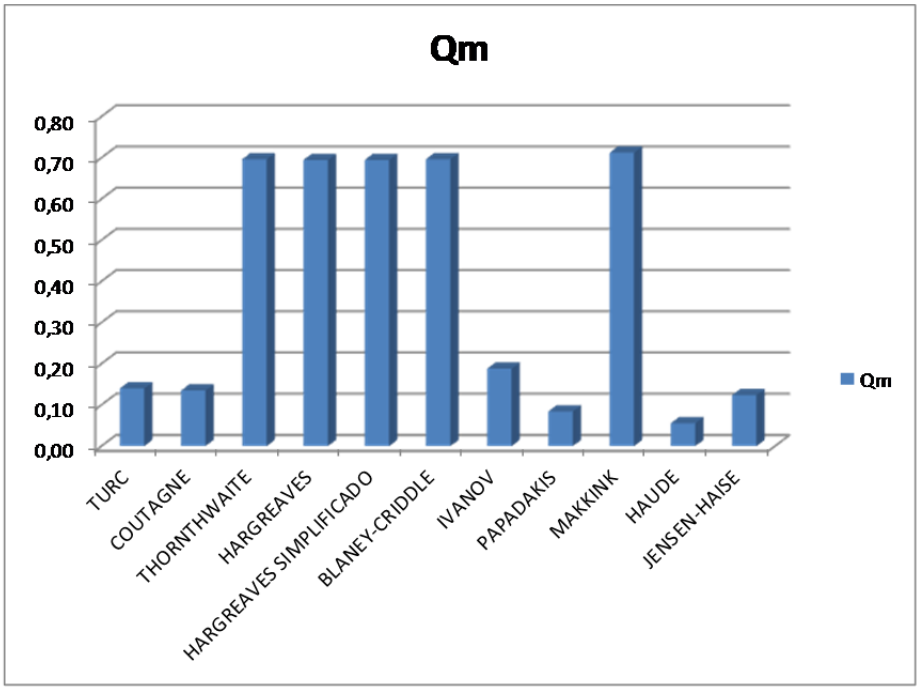
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,06451613	2,928571429	6,25806452	6,933333333	10,4516129	15,7666667	16,51612903	17,09677419	14,03333333	10,32258065	5,233333333	3,419354839

Tabla 31. Datos iniciales de partida en la Central Nuestra Señora de los Ángeles

Los resultados obtenidos de los caudales medios anuales se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,14
COUTAGNE	0,13
THORNTHWAITE	0,70
HARGREAVES	0,69
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,69
BLANEY-CRIDDLE	0,70
IVANOV	0,19
PAPADAKIS	0,08
MAKKINK	0,71
HAUDE	0,06
JENSEN-HAISE	0,12
PENNAN	0,17



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,19**

Tabla 32. Resultados de Caudal de la Central de Nuestra Señora de los Ángeles.

11.2.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real =0,23 m^3/s		
Método	Caudal medio (m^3/s)	Error (%)
TURC	0,14	39,23
COUTAGNE	0,13	41,43
THORNTHWAITE	0,70	-202,86
HARGREAVES	0,69	-202,03
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,69	-201,99
BLANEY-CRIDDLE	0,70	-202,86
IVANOV	0,19	18,36
PAPADAKIS	0,08	63,40
MAKKINK	0,71	-209,68
HAUDE	0,06	75,90
JENSEN-HAISE	0,12	46,23
PENNAN	0,17	26,00

Tabla 33. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Ntra. Sra. de los Ángeles.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov y Pennan ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 200%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.3 CENTRAL VALDEPEÑAS. VALDEPEÑAS DE JAÉN

Fig. 63. Central Valdepeñas.

11.3.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Valdepeñas de Jaén, coordenadas UTM (Huso 30): 424.729 , 4.160.952. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

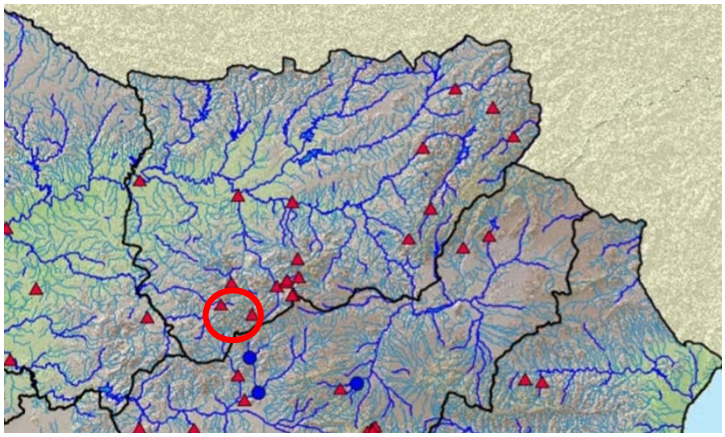


Fig. 64. Situación Central Valdepeñas.

El río que fluye por su cuenca es el Río Susana.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 109.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 1,03.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.942 - 1.986.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 1,20.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,12.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 1.000.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 4.417,19.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 1.612,27.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

Fig. 65. Esquema Central Valdepeñas.

Superficie de la Cuenca de Captación: 85,7 km^2.

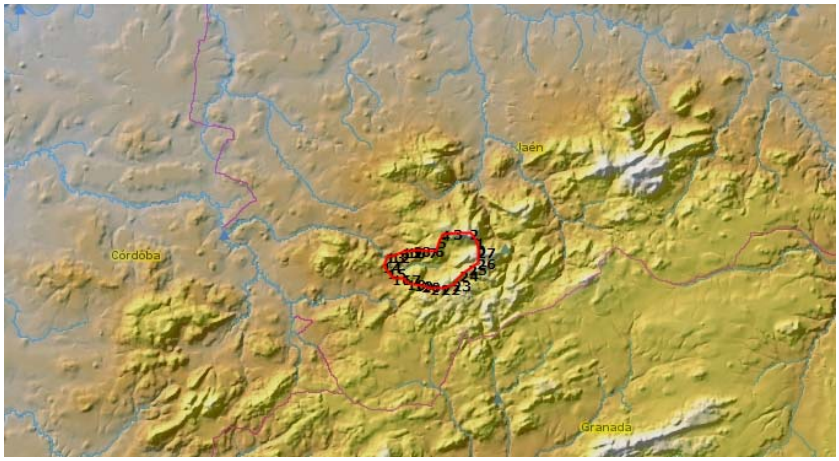


Fig. 66. Cuenca de Captación de la Central Valdepeñas.

11.3.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

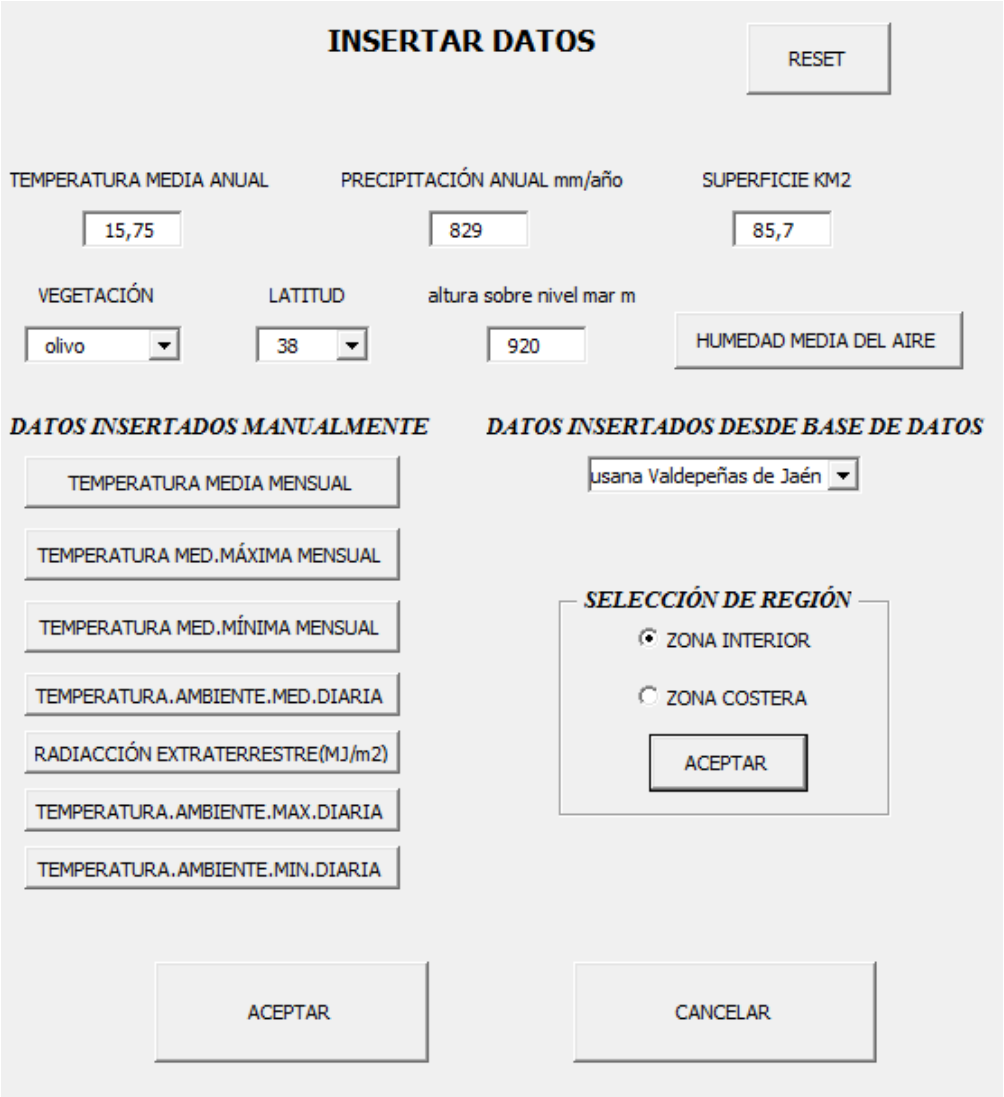


Fig. 67. Panel. Inserción datos 5.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,75
precipitación anual (mm/año)	829
superficie (km2)	85,7
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,12903226	8,28571429	11,6774194	12,6666667	17,2580645	24,3666667	26,1935484	25,9677419	21,5	15,7741935	9,96666667	8,19354839

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
10,9677419	13,07142857	16,6451613	17,93333333	23,25806452	31,6	33,25806452	33,03225806	27,76666667	20,83870968	13,76666667	12

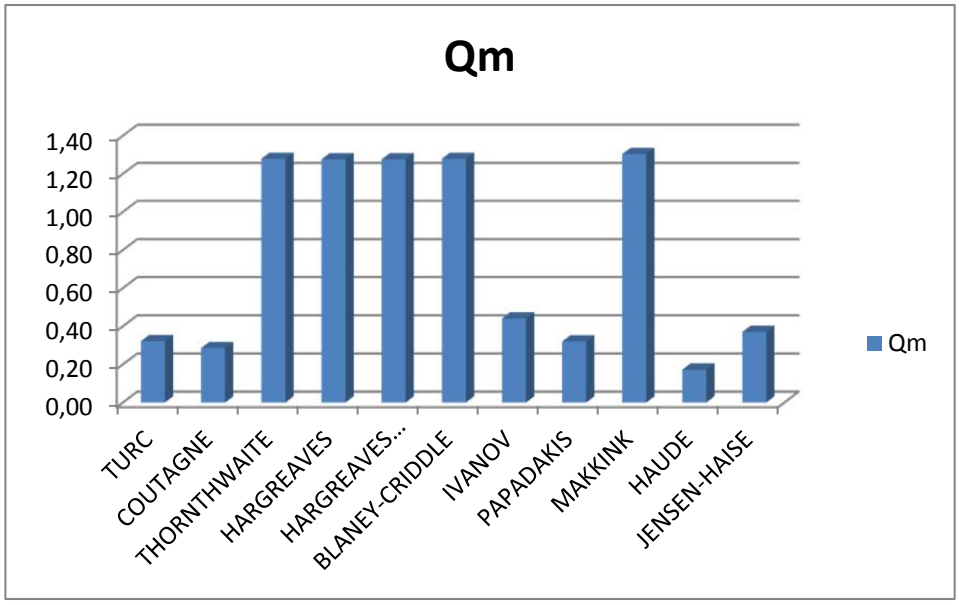
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
3,70967742	4,25	7,22580645	7,866666667	11,58064516	17,6333333	18,90322581	19,25806452	15,83333333	11,58064516	6,366666667	5

Tabla 34. Datos iniciales de partida en la Central Valdepeñas.

Los resultados obtenidos de los caudales medios anuales se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,76
COUTAGNE	0,62
THORNTHWAITE	2,25
HARGREAVES	2,25
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,25
BLANEY-CRIDDLE	2,25
IVANOV	0,95
PAPADAKIS	0,81
MAKKINK	2,29
HAUDE	0,44
JENSEN-HAISE	0,84
PENNAN	0,90



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**1,16**

Tabla 35. Resultados de Caudal de la Central Valdepeñas.

11.3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real =1,03 m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,76	26,21
COUTAGNE	0,62	39,68
THORNTHWAITE	2,25	-118,65
HARGREAVES	2,25	-118,34
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,25	-118,33
BLANEY-CRIDDLE	2,25	-118,65
IVANOV	0,95	7,41
PAPADAKIS	0,81	21,47
MAKKINK	2,29	-121,94
HAUDE	0,44	57,45
JENSEN-HAISE	0,84	18,62
PENNAN	0,90	12,97

Tabla 36. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Valdepeñas.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, Papadakis y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 100%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.4 CENTRAL RÍO FRÍO. LOS VILLARES

Fig. 68. Central Río Frío.

11.4.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Los Villares de Jaén, coordenadas UTM (Huso 30): 428.958 , 4.169.443. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

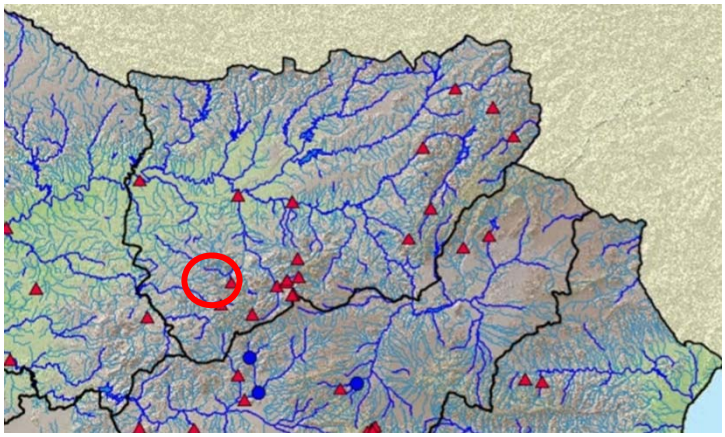


Fig. 69. Situación Central Río Frío.

El río que fluye por su cuenca es el Río Frío.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 155.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,057.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.997 - 2.002.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,08.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,008.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 85.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 535,5.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 341,46.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

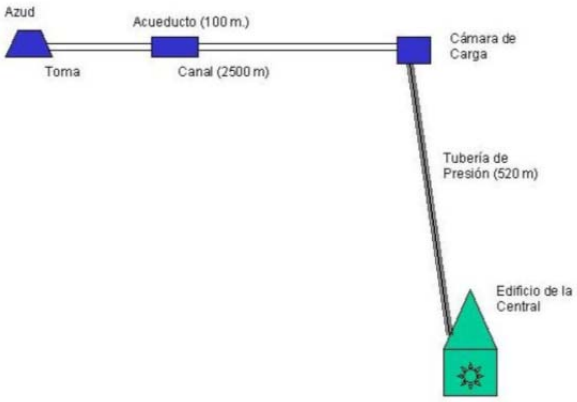


Fig. 70. Esquema Central Río Frío.

Superficie de la Cuenca de Captación: 20,8 km^2.

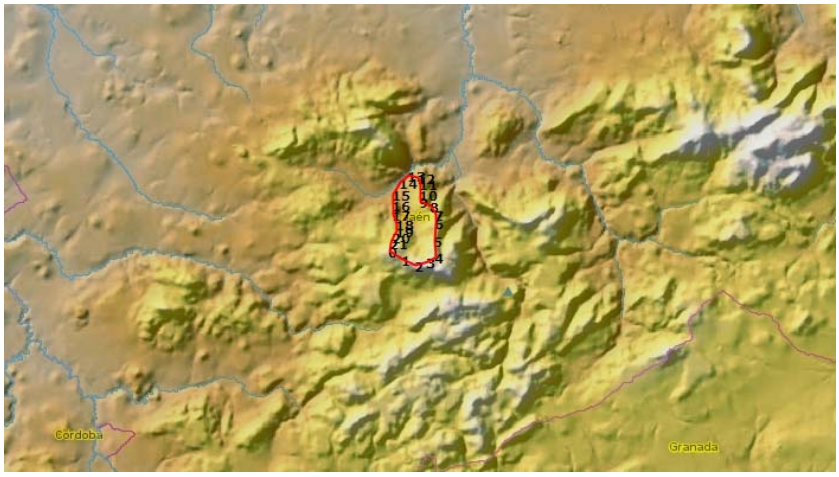


Fig. 71. Cuenca de Captación de la Central Río Frío.

11.4.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

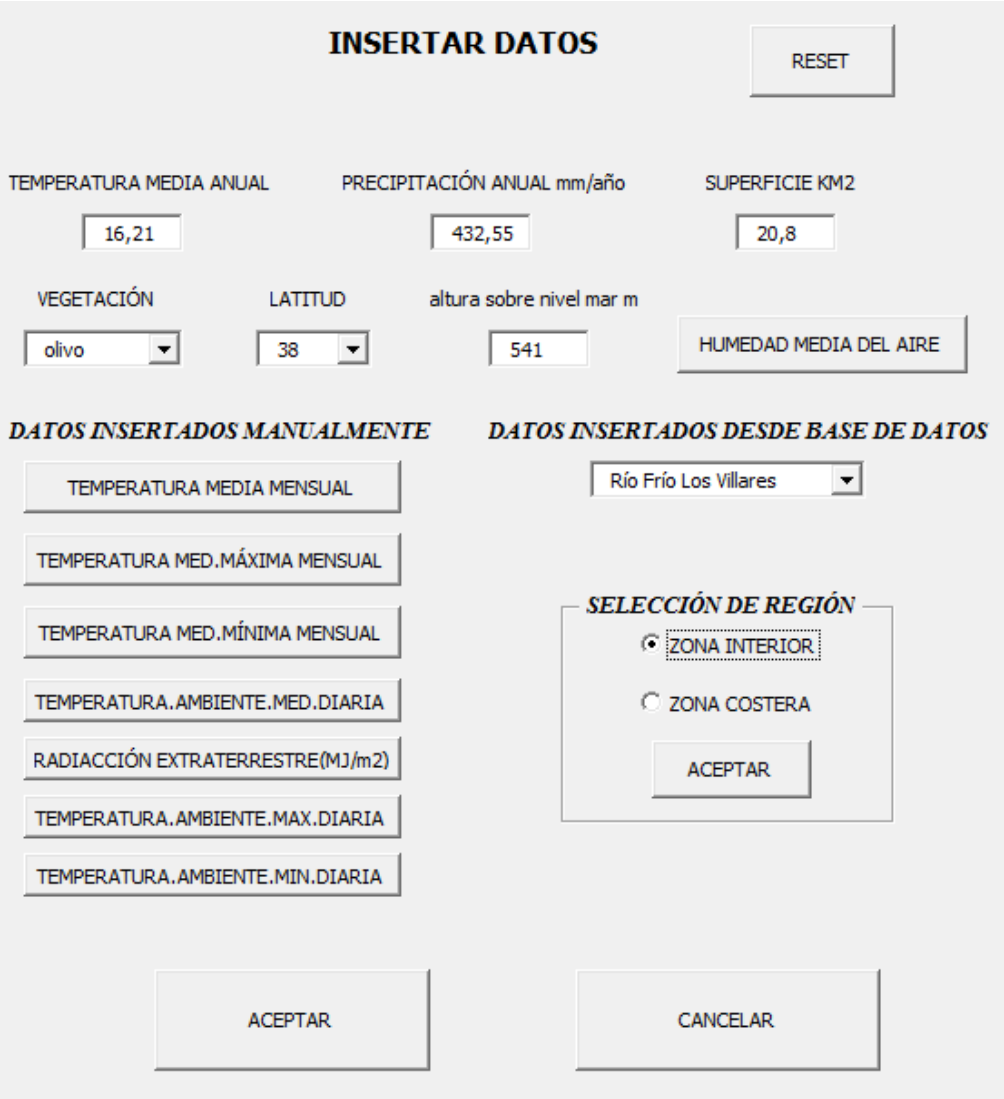


Fig. 72. Panel. Inserción datos 6.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	16,21
precipitación anual (mm/año)	432,55
superficie (km2)	20,8
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,548	9,036	12,32	13,9	18,1	24,93	26,23	26	21,63	16,06	10,57	8,194

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
14,2258065	16,35714286	19,3870968	21,5	26	34,0666667	35,4516129	35,25806452	30,26666667	23,48387097	16,73333333	14,5483871

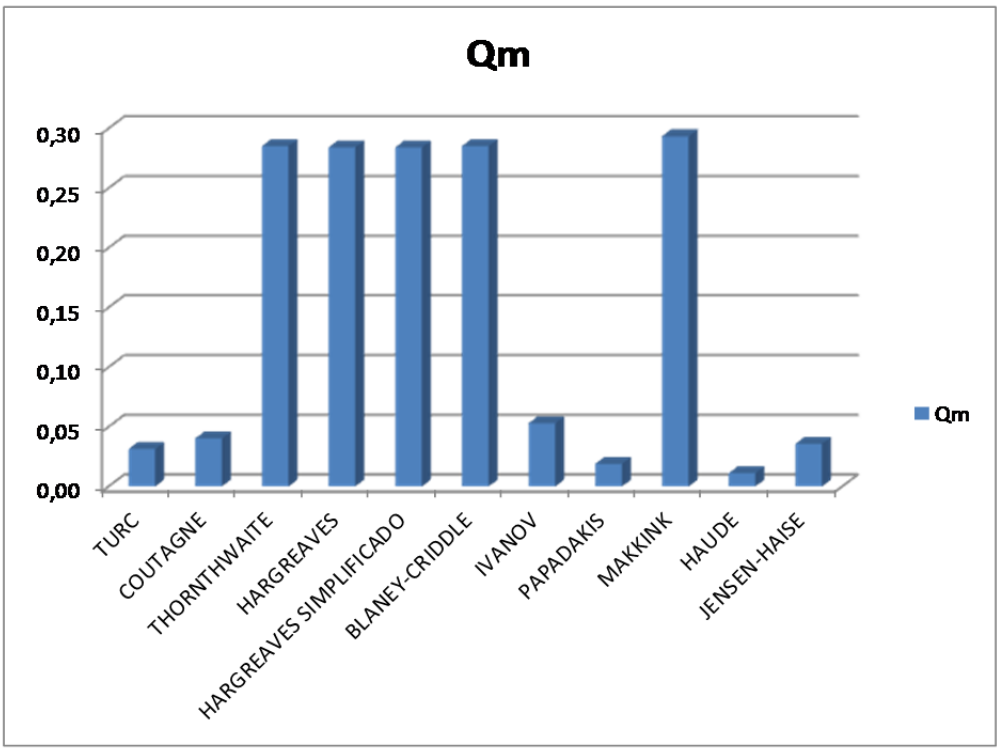
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,06451613	2,928571429	6,25806452	6,933333333	10,4516129	15,7666667	16,51612903	17,09677419	14,03333333	10,32258065	5,233333333	3,419354839

Tabla 37. Datos iniciales de partida en la Central de Río Frío.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,03
COUTAGNE	0,04
THORNTHWAITE	0,29
HARGREAVES	0,28
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,28
BLANEY-CRIDDLE	0,29
IVANOV	0,05
PAPADAKIS	0,02
MAKKINK	0,29
HAUDE	0,01
JENSEN-HAISE	0,04
PENNAN	0,05



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,05**

Tabla 38. Resultados de Caudal de la Central Río Frío.

11.4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,057m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,03	44,95
COUTAGNE	0,04	29,49
THORNTHWAITE	0,29	-400,36
HARGREAVES	0,28	-398,52
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,28	-398,43
BLANEY-CRIDDLE	0,29	-400,36
IVANOV	0,05	6,91
PAPADAKIS	0,02	66,74
MAKKINK	0,29	-414,87
HAUDE	0,01	80,54
JENSEN-HAISE	0,04	37,27
PENNAN	0,05	17,94

Tabla 39. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Río Frío.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan y Coutagne ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 400%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.5 CENTRAL PURÍSIMA CONCEPCIÓN. MENGÍBAR

Fig. 73. Central Purísima Concepción.

11.5.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Mengíbar, coordenadas UTM (Huso 30): 431.612 , 4.203.470. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

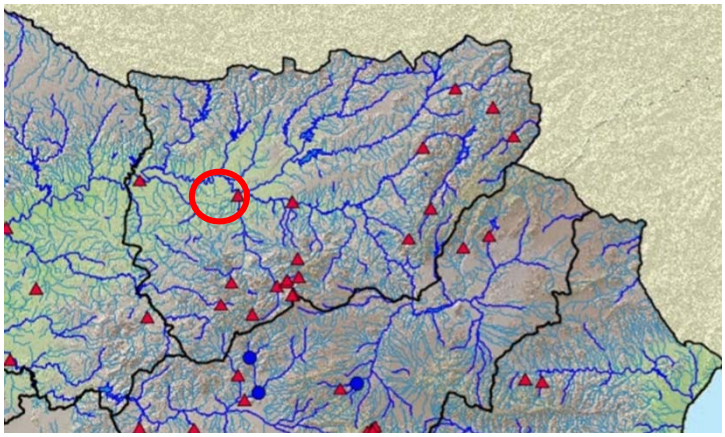


Fig. 74. Situación Central Purísima Concepción.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalbullón.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 18.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 5,77.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.911 - 1.995.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 1,00.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,40.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Semi-Kaplan - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 150.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 894,7.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 326,57.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

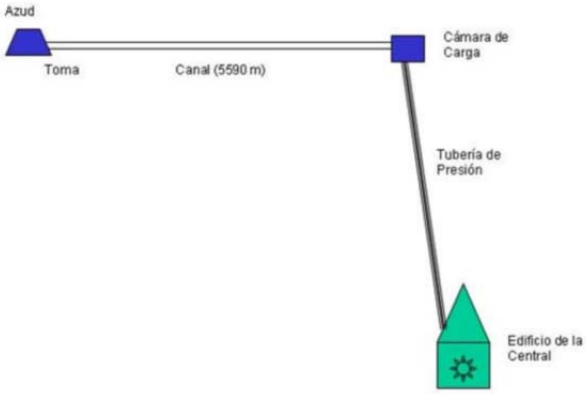


Fig. 75. Esquema Central Purísima Concepción.

Superficie de la Cuenca de Captación: 858 km^2.

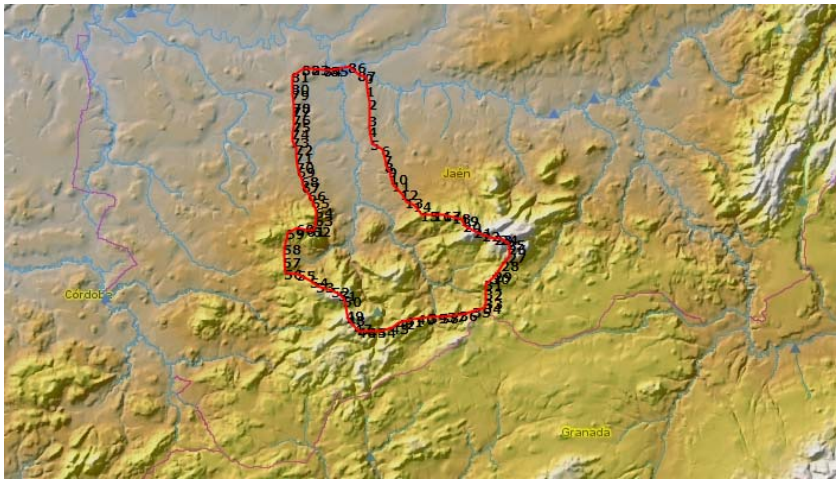


Fig. 76. Cuenca de Captación de la Central Purísima Concepción.

11.5.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

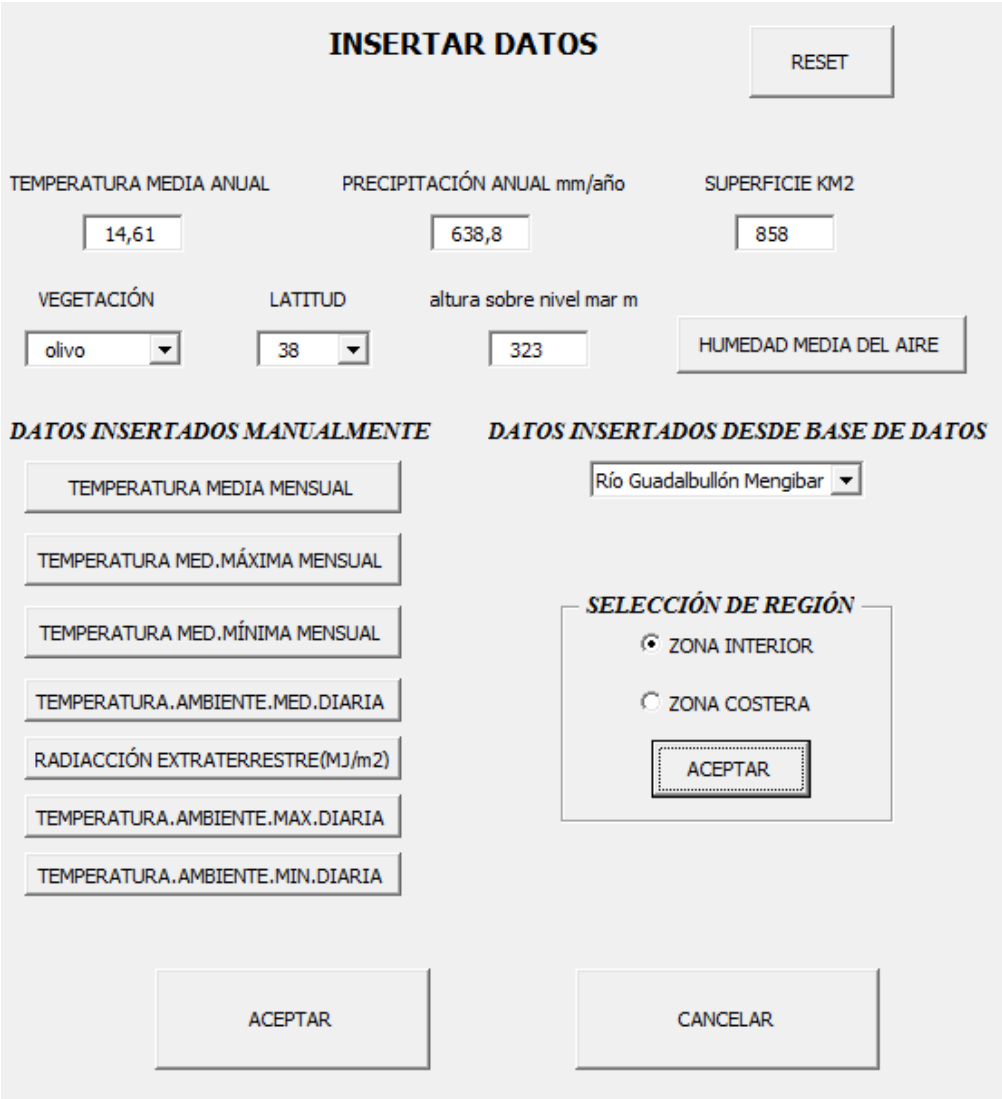


Fig. 77. Panel. Inserción datos 7.

Los resultados obtenidos de los caudales medios anuales se recogen en la siguiente tabla:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,61
precipitación anual (mm/año)	638,8
superficie (km2)	858
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,24885572	8,56332115	12,7493606	14,0863873	18,7794749	26,5195734	27,2749297	27,4805848	19,3979327	13,5346067	10,7769387	8,05283678

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
14,3225806	15,82142857	19,9354839	21,23333333	26,80645161	34,5333333	35,58064516	35,67741935	29,9	23,77419355	17,2	14,58064516

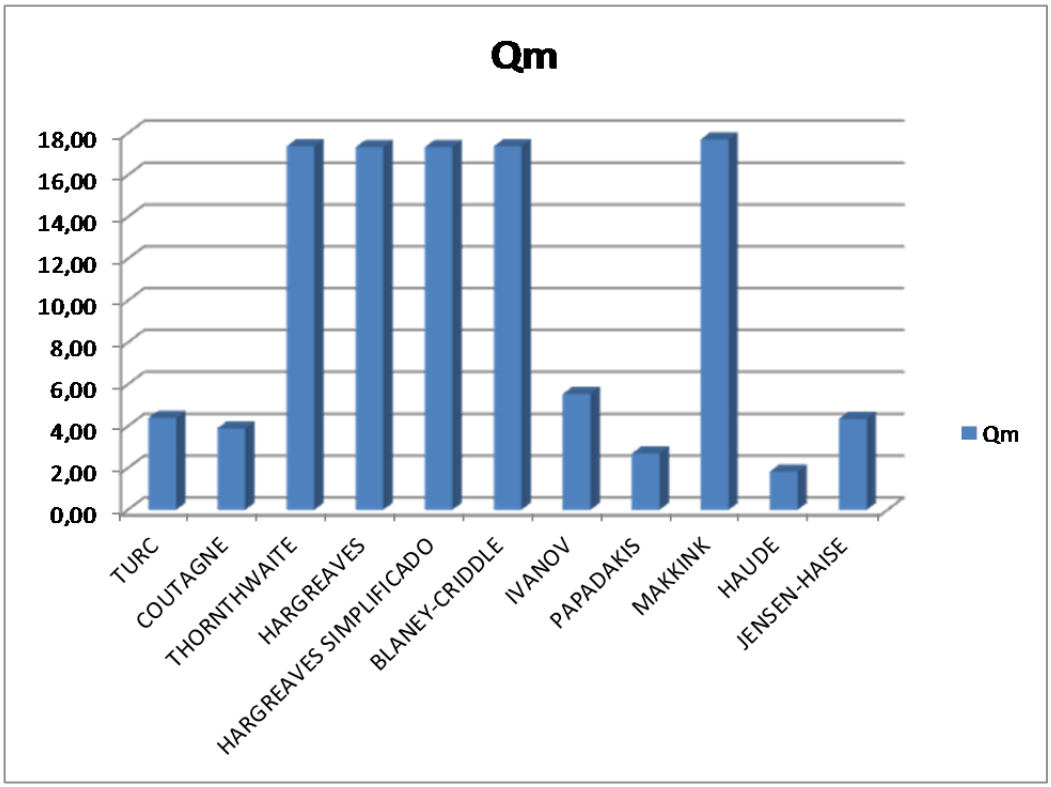
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,12903226	1,642857143	5,90322581	6,933333333	10,09677419	15,2	16,77419355	17,80645161	14,96666667	11	5,133333333	2,580645161

Tabla 40. Datos iniciales de partida en la Central Purísima Concepción.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	4,40
COUTAGNE	3,90
THORNTHWAITE	17,37
HARGREAVES	17,33
HARGREAVES SIMPLIFICADO	17,33
BLANEY-CRIDDLE	17,37
IVANOV	5,54
PAPADAKIS	2,69
MAKKINK	17,71
HAUDE	1,84
JENSEN-HAISE	4,35
PENNAN	5,09



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**4,66**

Tabla 41. Resultados de Caudal de la Central Purísima Concepción.

11.5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real =5,77 m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	4,40	23,75
COUTAGNE	3,90	32,40
THORNTHWAITE	17,37	-201,12
HARGREAVES	17,33	-200,39
HARGREAVES SIMPLIFICADO	17,33	-200,36
BLANEY-CRIDDLE	17,37	-201,12
IVANOV	5,54	3,99
PAPADAKIS	2,69	53,32
MAKKINK	17,71	-207,00
HAUDE	1,84	68,16
JENSEN-HAISE	4,35	24,53
PENNAN	5,09	11,84

Tabla 42. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Purísima Concepción.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 200%, quedando estos totalmente descartados.

11.6 CENTRAL PUENTE DEL OBISPO. BEGÍJAR

Fig. 78. Central Puente del Obispo.

11.6.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Begijar, coordenadas UTM (Huso 30): 452.844 , 4.200.862. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

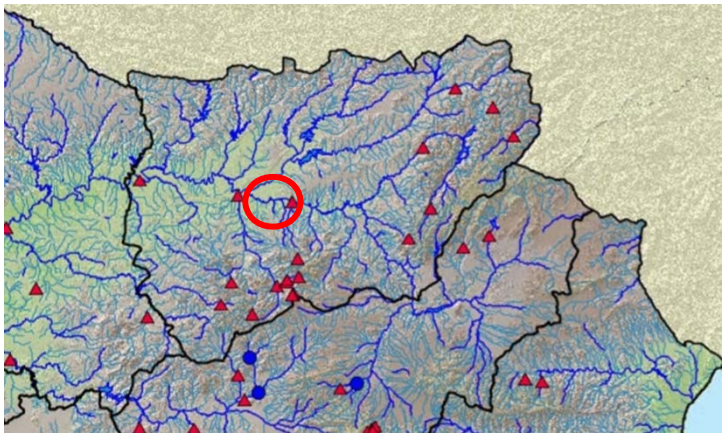


Fig. 79. Situación Central Puente del Obispo.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalquivir.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 2,48.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 20,00.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.949 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 5,00.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 2,00.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Semi Kaplan - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 100.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 833.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 304,05.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

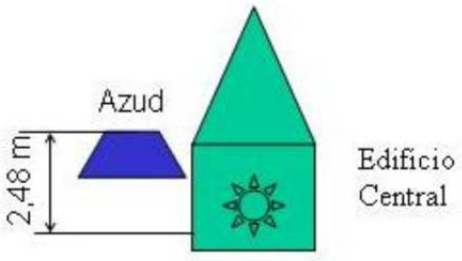


Fig. 80. Esquema Central Puente del Obispo.

Superficie de la Cuenca de Captación: 1659 km^2.

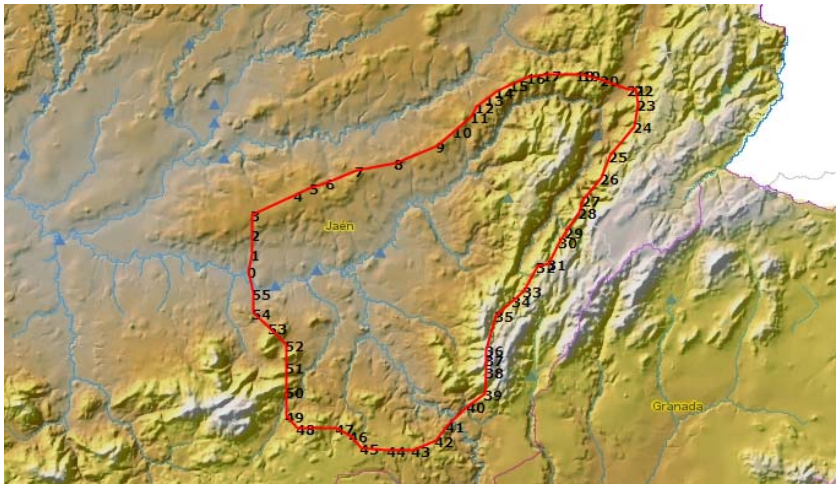


Fig. 81. Cuenca de Captación de la Central Puente del Obispo.

11.6.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

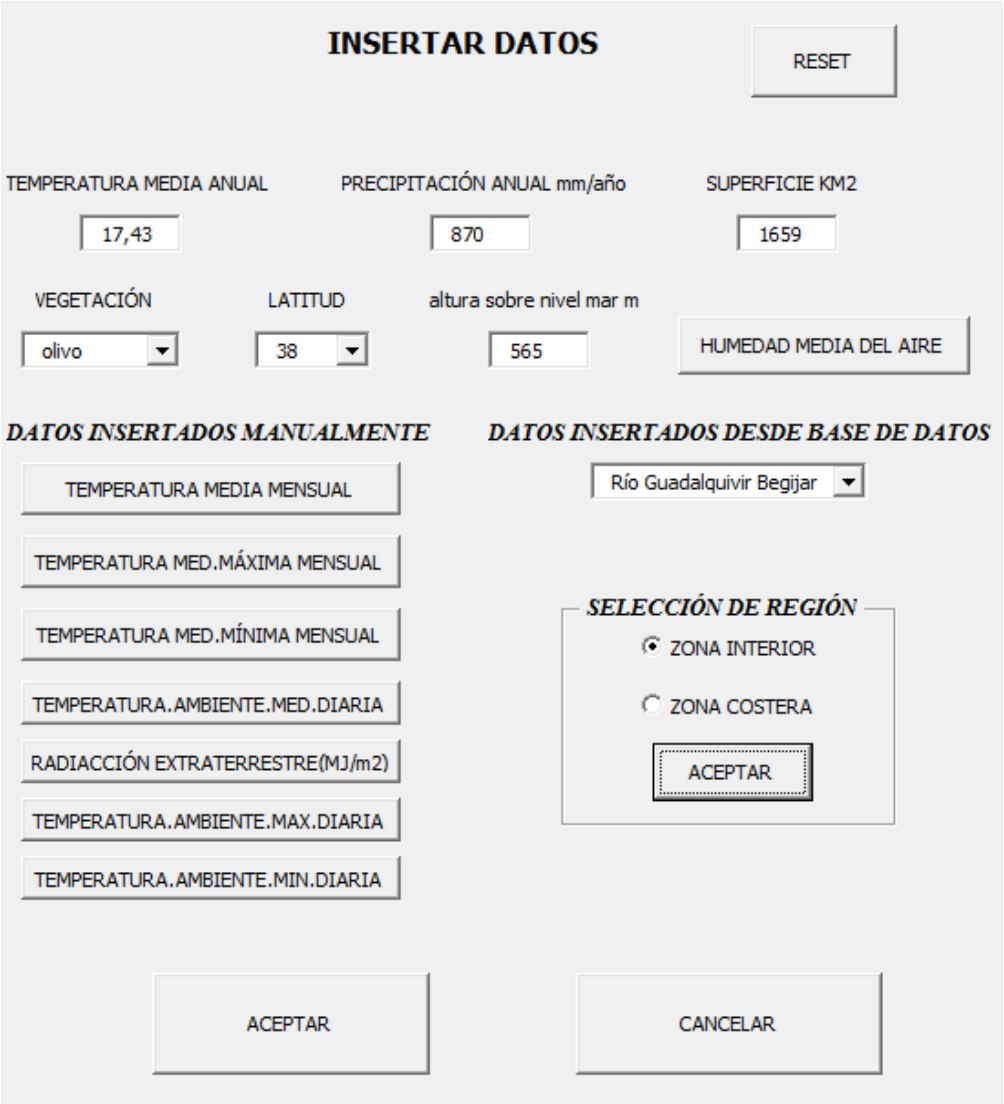


Fig. 82. Panel. Inserción datos 8.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	17,43
precipitación anual (mm/año)	870
superficie (km2)	1659
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
8,51612903	9,75	13,7096774	15,1666667	19,5483871	26,3666667	27,5483871	27,6451613	23,1	17,1290323	11,4	9,25806452

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
13,3548387	15,42857143	19,4516129	21,1	26	33,9333333	34,90322581	34,77419355	29,66666667	22,70967742	16,23333333	14,29032258

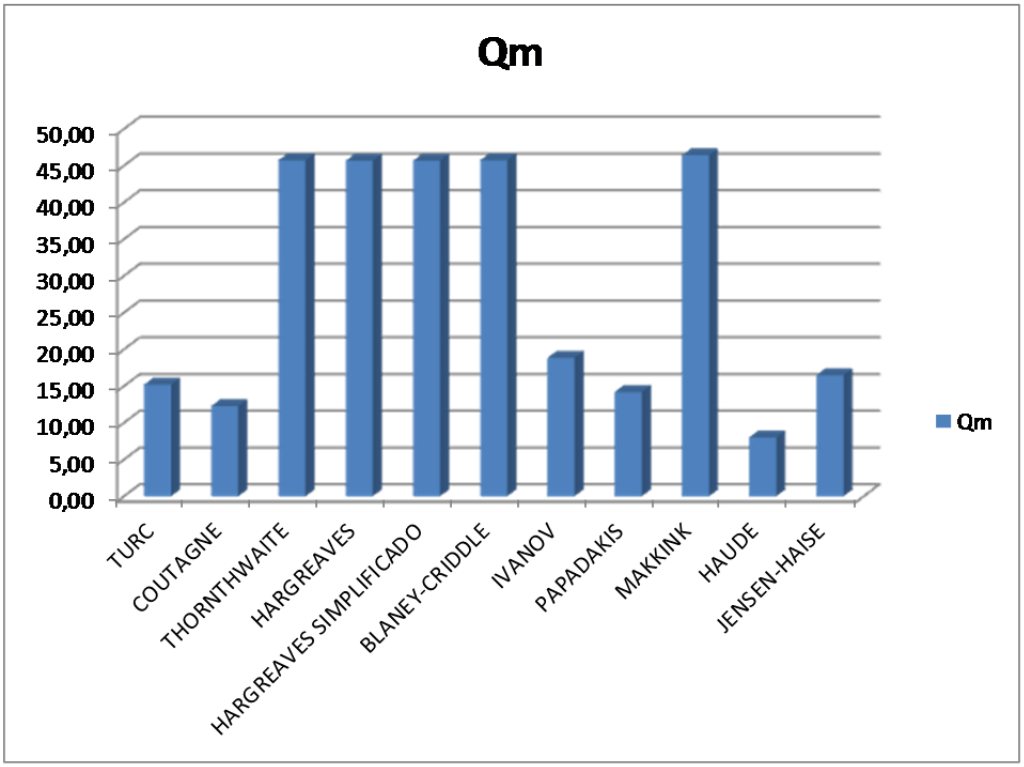
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
4,22580645	4,892857143	8,74193548	9,3	12,96774194	18,6333333	19,61290323	19,93548387	16,86666667	12,38709677	7,266666667	5,290322581

Tabla 43. Datos iniciales de partida en la Central Puente del Obispo.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	15,20
COUTAGNE	12,28
THORNTHWAITE	45,75
HARGREAVES	45,68
HARGREAVES SIMPLIFICADO	45,68
BLANEY-CRIDDLE	45,75
IVANOV	18,86
PAPADAKIS	14,21
MAKKINK	46,41
HAUDE	8,03
JENSEN-HAISE	16,51
PENNAN	18,19



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**23,33**

Tabla 44. Resultados de Caudal de la Central Puente del Obispo.

11.6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 20 m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	15,20	24,01
COUTAGNE	12,28	38,58
THORNTHWAITE	45,75	-128,77
HARGREAVES	45,68	-128,40
HARGREAVES SIMPLIFICADO	45,68	-128,38
BLANEY-CRIDDLE	45,75	-128,77
IVANOV	18,86	5,72
PAPADAKIS	14,21	28,97
MAKKINK	46,41	-132,04
HAUDE	8,03	59,87
JENSEN-HAISE	16,51	17,43
PENNAN	18,19	9,05

Tabla 45. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Puente del Obispo.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, Papadakis y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 100%, dándonos hasta el doble del caudal real, quedando estos totalmente descartados.

11.7 CENTRAL SANTAL ISABEL. TORRES

Fig. 83. Central Santa Isabel.

11.7.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Torres, coordenadas UTM (Huso 30): 454.781 , 4.178.871. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

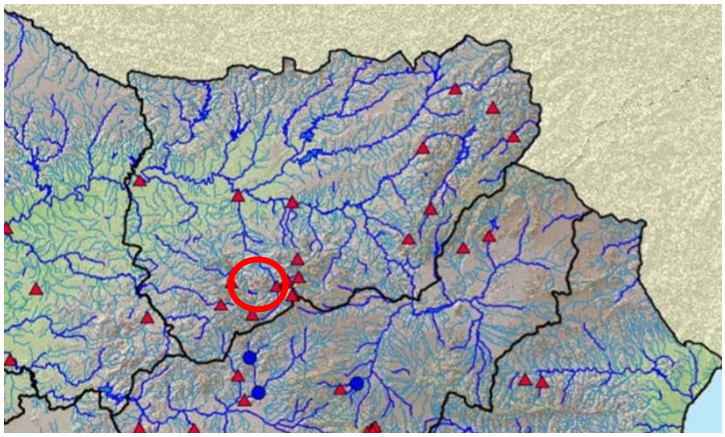


Fig. 84. Situación Central Santa Isabel.

El río que fluye por su cuenca es el Arrollo de Agua Blanca.
Es de propiedad particular.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 88.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,0386.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.982 - 2.002.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,055.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,006.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 35.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 183,48.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 66,97.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

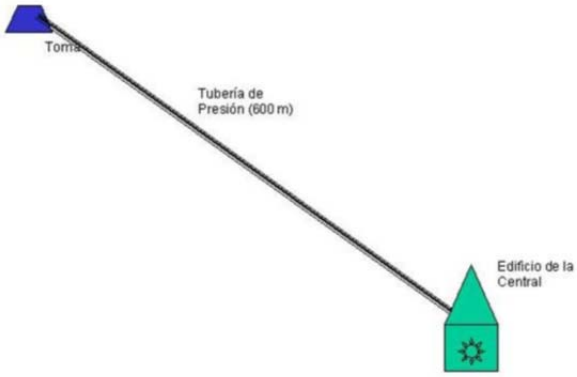


Fig. 85. Esquema Central Santa Isabel.

Superficie de la Cuenca de Captación: 6,64 km^2.

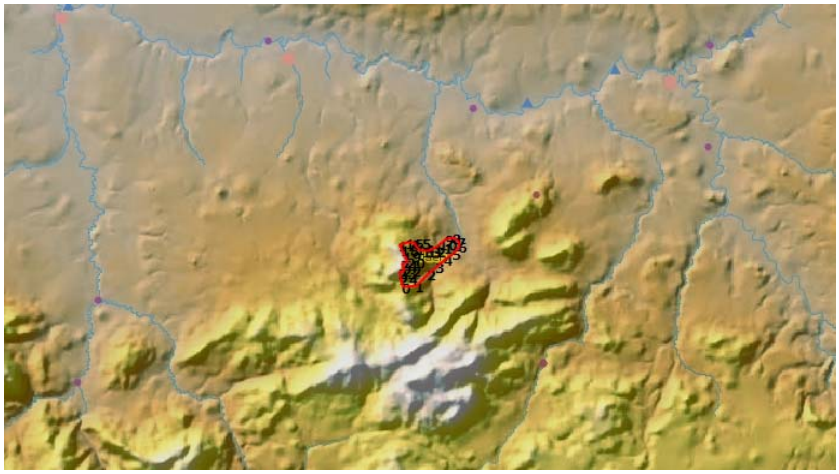


Fig. 86. Cuenca de Captación de la Central Santa Isabel.

11.7.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

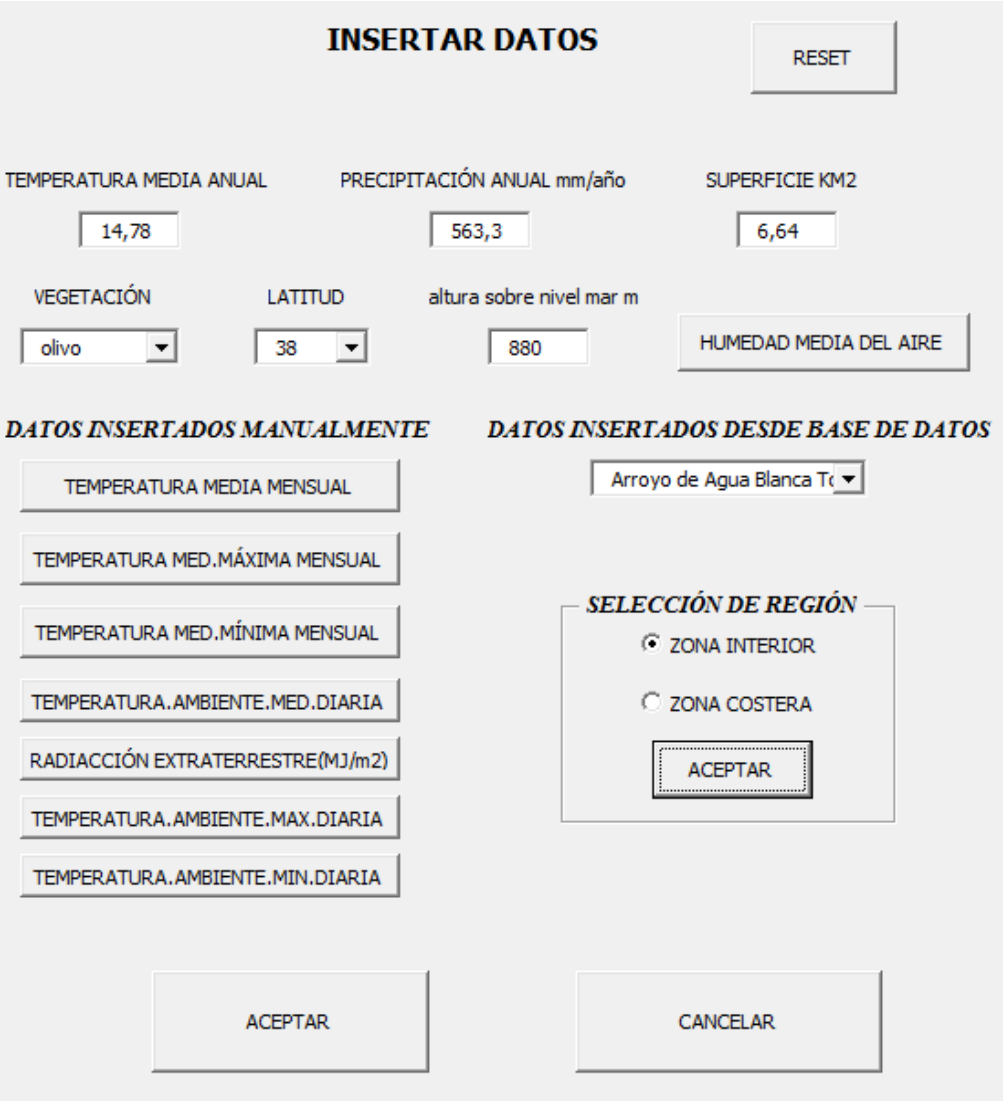


Fig. 87. Panel. Inserción datos 9.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,78
precipitación anual (mm/año)	563,3
superficie (km2)	6,64
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

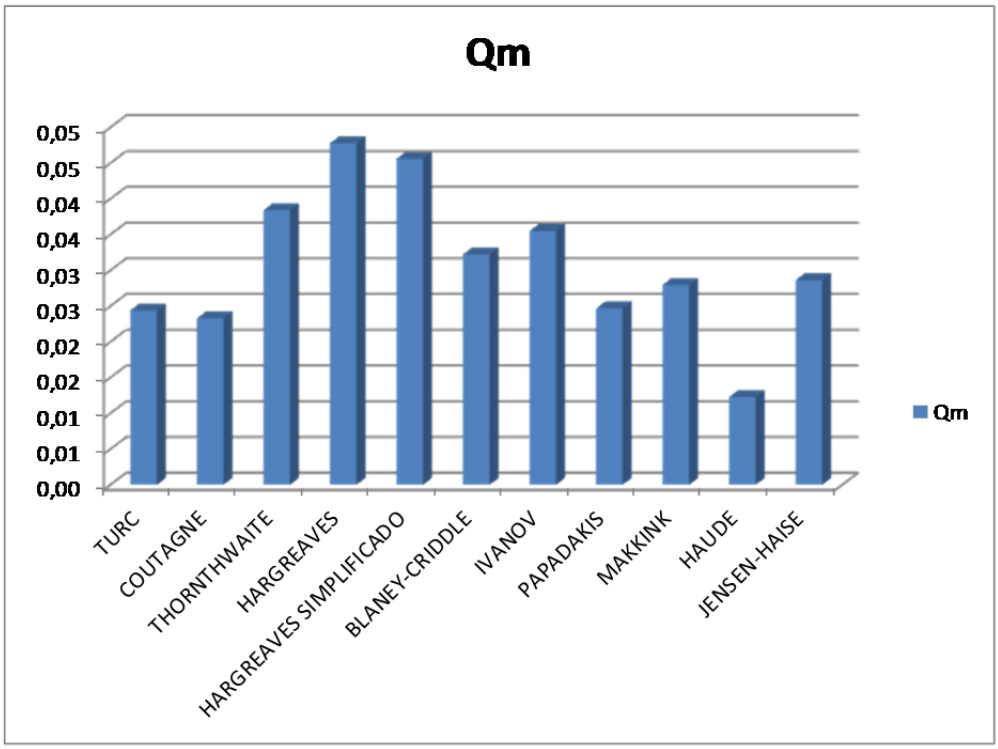
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 46. Datos iniciales de partida en la Central Santa Isabel.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,02
COUTAGNE	0,02
THORNTHWAITE	0,04
HARGREAVES	0,05
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,05
BLANEY-CRIDDLE	0,03
IVANOV	0,04
PAPADAKIS	0,02
MAKKINK	0,03
HAUDE	0,01
JENSEN-HAISE	0,03
PENNAN	0,03



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,03**

Tabla 47. Resultados de Caudal de la Central Santa Isabel.

11.7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,0386m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,02	36,79
COUTAGNE	0,02	39,69
THORNTHWAITE	0,04	0,52
HARGREAVES	0,05	-23,78
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,05	-18,10
BLANEY-CRIDDLE	0,03	16,53
IVANOV	0,04	8,00
PAPADAKIS	0,02	36,06
MAKKINK	0,03	27,54
HAUDE	0,01	68,22
JENSEN-HAISE	0,03	25,84
PENNAN	0,03	18,29

Tabla 48. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Santa Isabel.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, Makkink, Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves Simplificado y Thornthwaite ofrecen un resultado muy próximo al real. Quedando exclusivamente fuera los caudales obtenidos mediante Turc, Coutagne, Papadakis y Haude, los cuales serían descartados.

11.8 CENTRAL MATA BEGID. CAMBIL

Fig. 88. Central Mata Begid.

11.8.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cambil, coordenadas UTM (Huso 30): 454.938 , 4.171.791. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

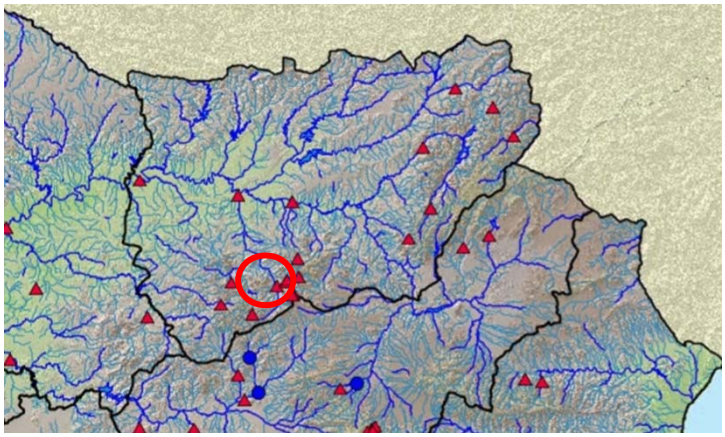


Fig. 89. Situación Central Mata Begid.

El río que fluye por su cuenca es el Arrollo de la Piedra del Águila.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 80.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,096.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.983 - 2.001.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,30.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,09.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Francis - Generador síncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 200.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 691,2.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 252,29.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

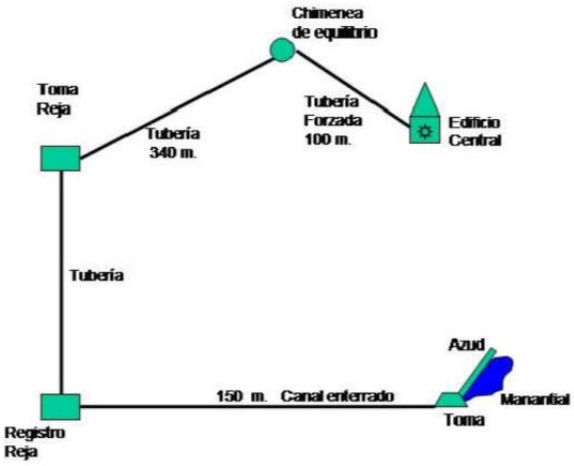


Fig. 90. Esquema Central Mata Begid.

Superficie de la Cuenca de Captación: 18,09 km^2.

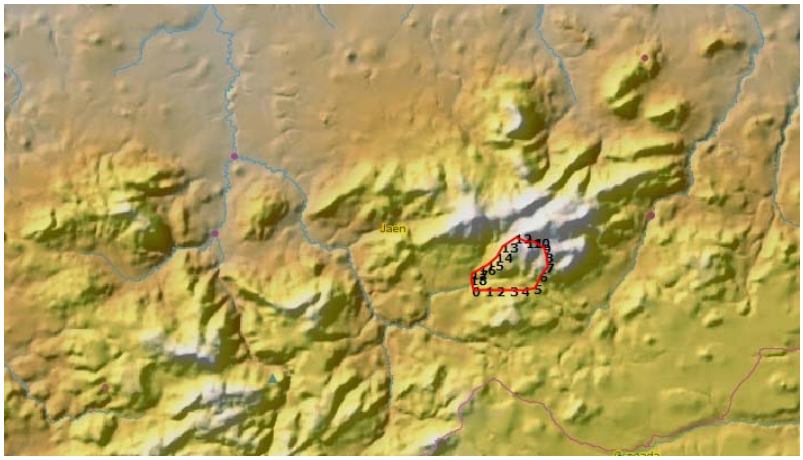


Fig. 91. Cuenca de Captación de la Central Mata Begid.

11.8.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

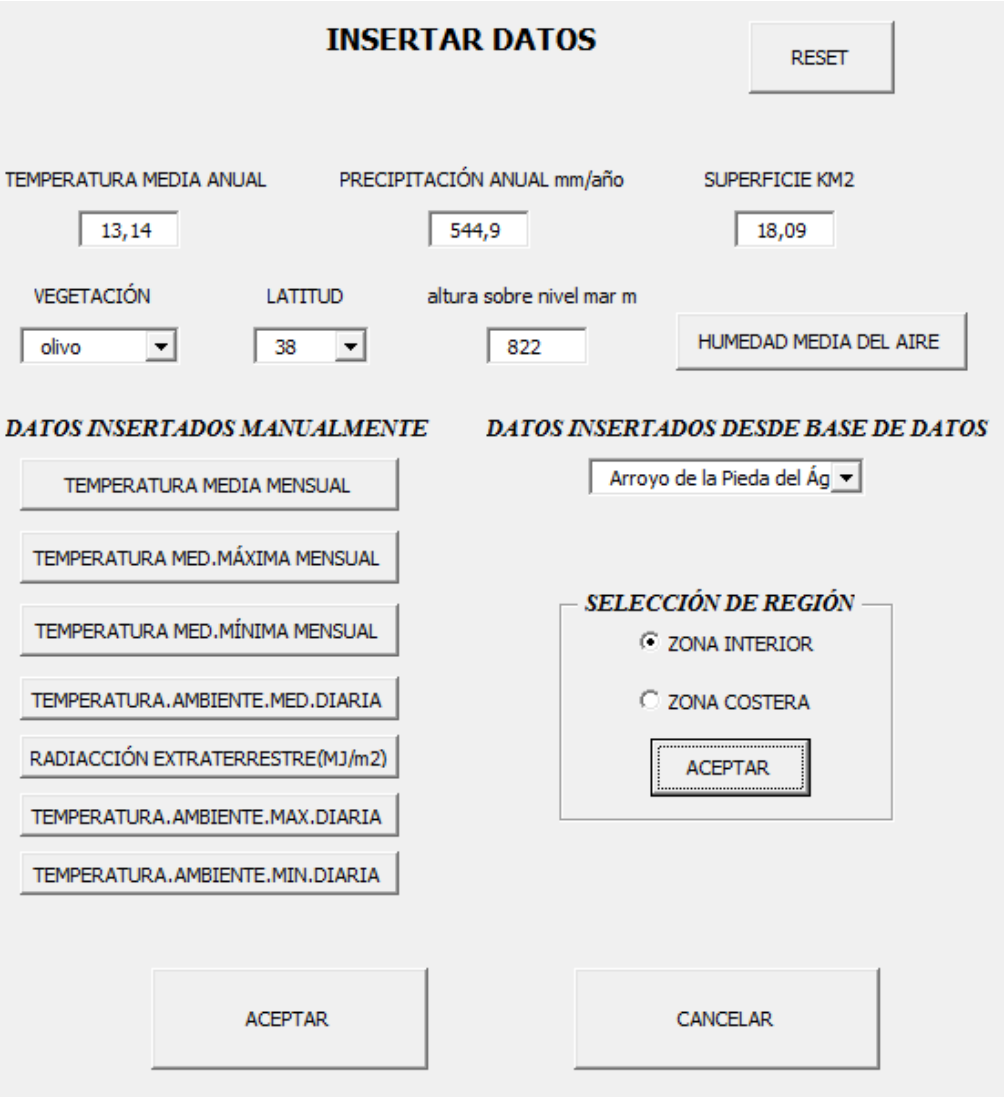


Fig. 92. Panel. Inserción datos 10.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	13,14
precipitación anual (mm/año)	544,9
superficie (km2)	18,09
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

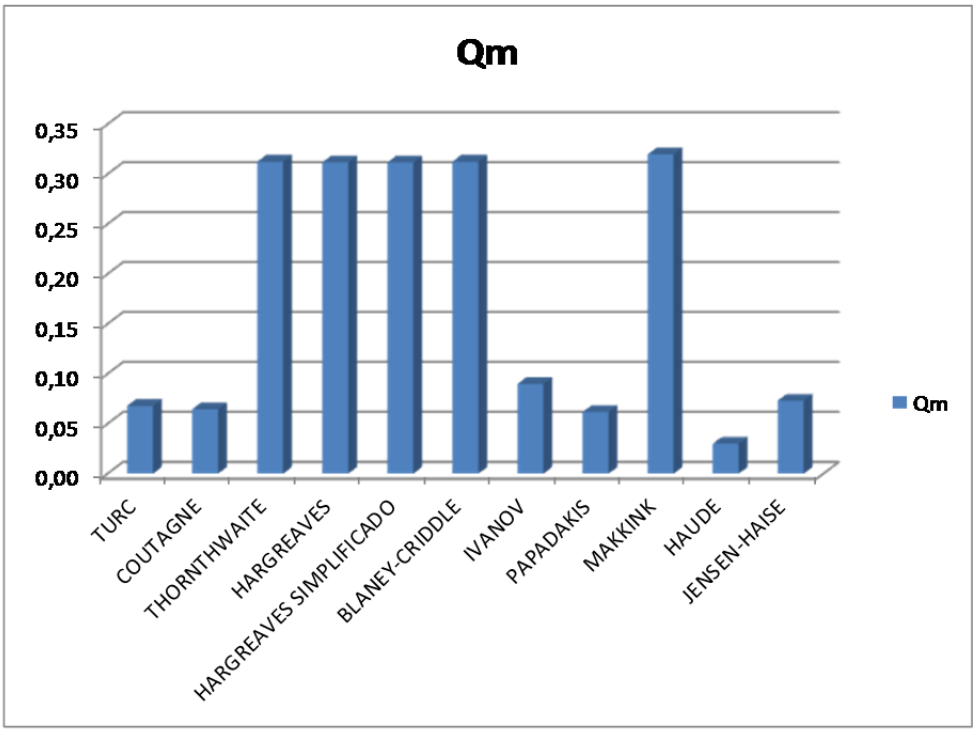
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 49. Datos iniciales de partida en la Central Mata Begid.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,07
COUTAGNE	0,06
THORNTHWAITE	0,31
HARGREAVES	0,31
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31
BLANEY-CRIDDLE	0,31
IVANOV	0,09
PAPADAKIS	0,06
MAKKINK	0,32
HAUDE	0,03
JENSEN-HAISE	0,07
PENNAN	0,08



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,07**

Tabla 50. Resultados de Caudal de la Central Mata Begid.

11.8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,096m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,07	29,34
COUTAGNE	0,06	32,81
THORNTHWAITE	0,31	-225,49
HARGREAVES	0,31	-224,75
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31	-224,71
BLANEY-CRIDDLE	0,31	-225,49
IVANOV	0,09	6,40
PAPADAKIS	0,06	35,74
MAKKINK	0,32	-232,97
HAUDE	0,03	68,81
JENSEN-HAISE	0,07	23,82
PENNAN	0,08	17,21

Tabla 51. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Mata Begid.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 200%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.9 CENTRAL SAN CAYETANO. ARBUNIEL (CAMBIL)

Fig. 93. Central San Cayetano.

11.9.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cambil, coordenadas UTM (Huso 30): 452.960 , 4.165.210. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

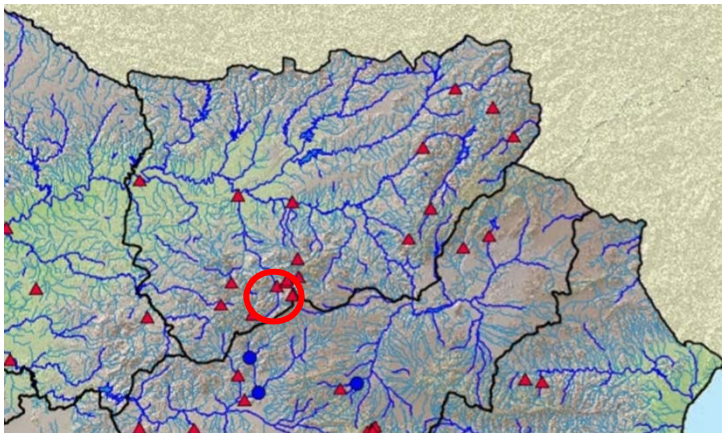


Fig. 94. Situación Central San Cayetano.

El río que fluye por su cuenca es el Río Arbuniel.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 12,8.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,473.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.983 - 2.001.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,30.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,09.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Francis - Generador síncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 30.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 205,77.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 75,11.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

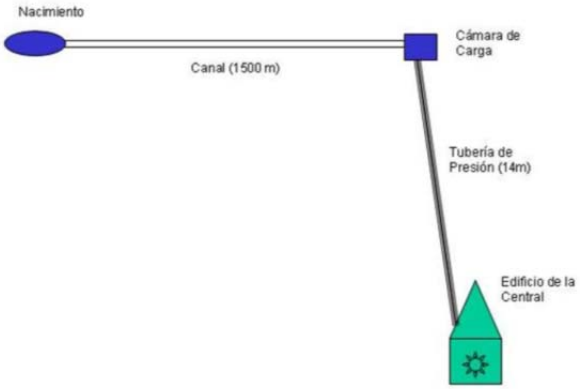


Fig. 95. Esquema Central San Cayetano.

Superficie de la Cuenca de Captación: 63,2 km^2.

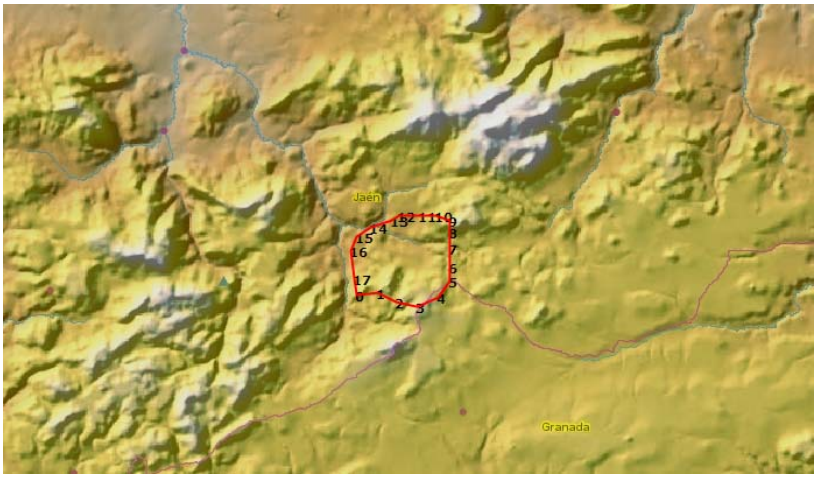


Fig. 96. Cuenca de Captación de la Central San Cayetano.

11.9.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

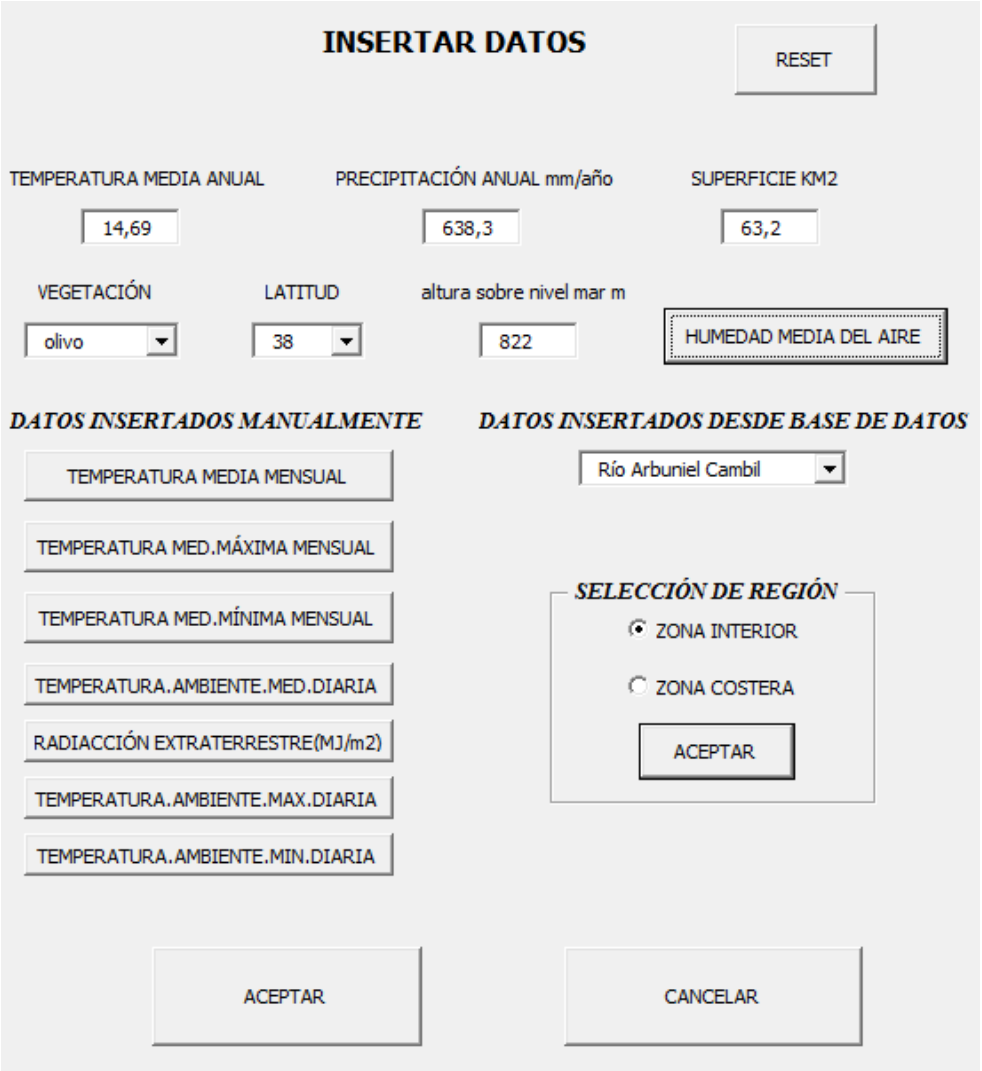


Fig. 97. Panel. Inserción datos 11.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,69
precipitación anual (mm/año)	638,3
superficie (km2)	63,2
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

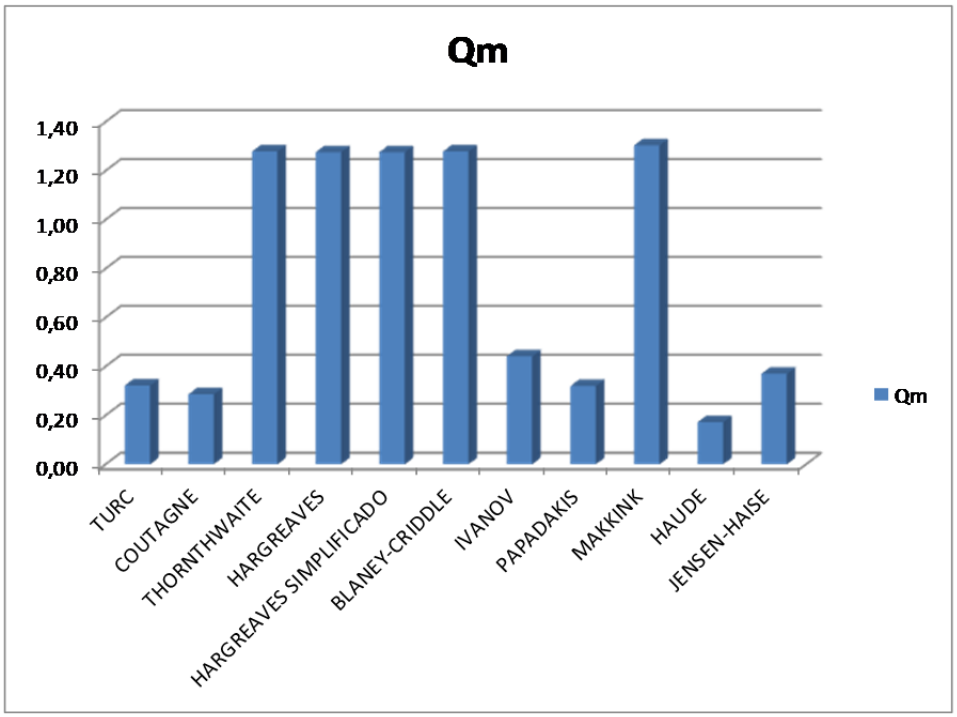
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 52. Datos iniciales de partida de la Central San Cayetano.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,32
COUTAGNE	0,29
THORNTHWAITE	1,28
HARGREAVES	1,28
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,28
BLANEY-CRIDDLE	1,28
IVANOV	0,44
PAPADAKIS	0,32
MAKKINK	1,30
HAUDE	0,17
JENSEN-HAISE	0,37
PENNAN	0,40



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,36**

Tabla 53. Resultados de Caudal de la Central San Cayetano.

11.9.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,473m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,32	31,93
COUTAGNE	0,29	39,59
THORNTHWAITE	1,28	-170,36
HARGREAVES	1,28	-169,81
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,28	-169,78
BLANEY-CRIDDLE	1,28	-170,36
IVANOV	0,44	6,71
PAPADAKIS	0,32	32,33
MAKKINK	1,30	-175,65
HAUDE	0,17	63,48
JENSEN-HAISE	0,37	21,75
PENNAN	0,40	15,98

Tabla 54. Comparación de Resultados de Caudal de la Central San Cayetano.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan y Jensen-Haise ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 170%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.10 CENTRAL JUNTA DE LOS RÍOS. CAMBIL

Fig. 98. Central Junta de los Ríos.

11.10.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cambil, coordenadas UTM (Huso 30): 446.810 , 4.168.080. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

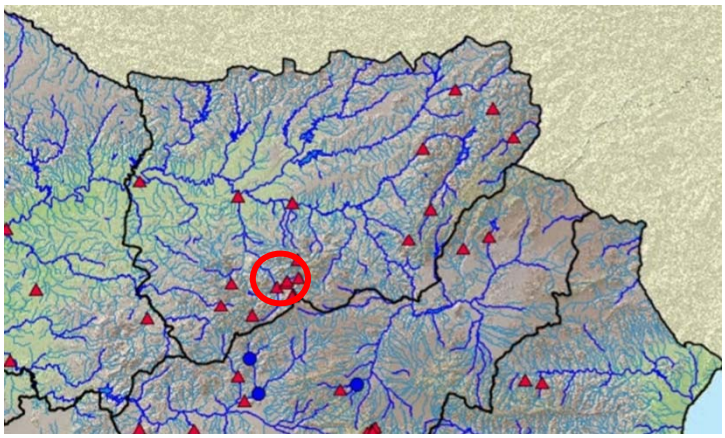


Fig. 99. Situación Central Junta de los Ríos.

El río que fluye por su cuenca es el Río Cambil.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 8.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,806.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.992 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 1,00.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,15.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Banki - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 55.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 290,64.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 106,08.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

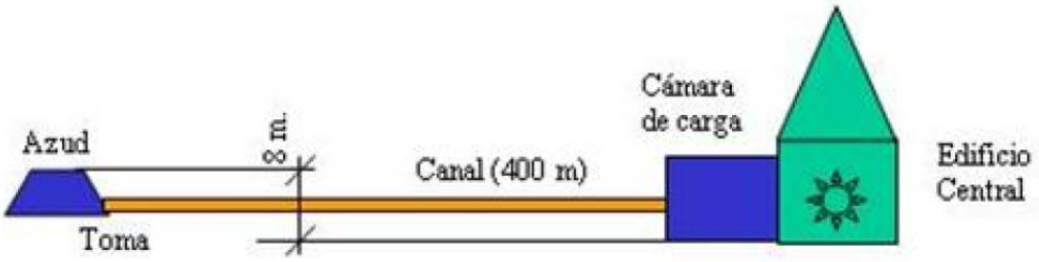


Fig. 100. Esquema Central Junta de los Ríos.

Superficie de la Cuenca de Captación: 139 km^2.

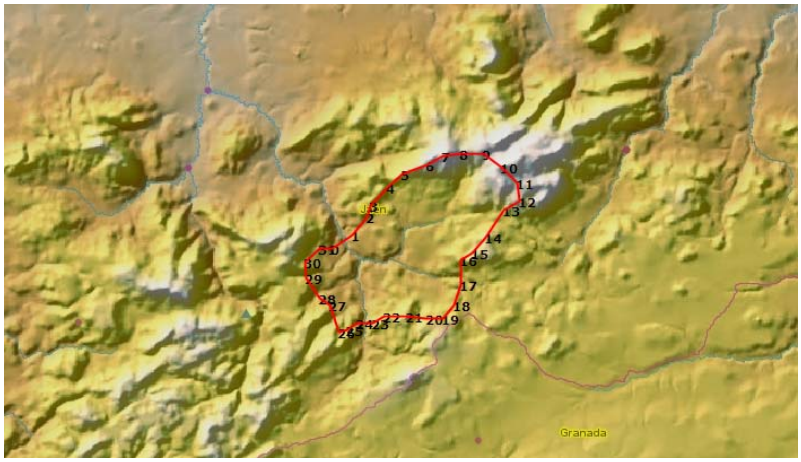


Fig. 101. Cuenca de Captación de la Central Junta de los Ríos.

11.10.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

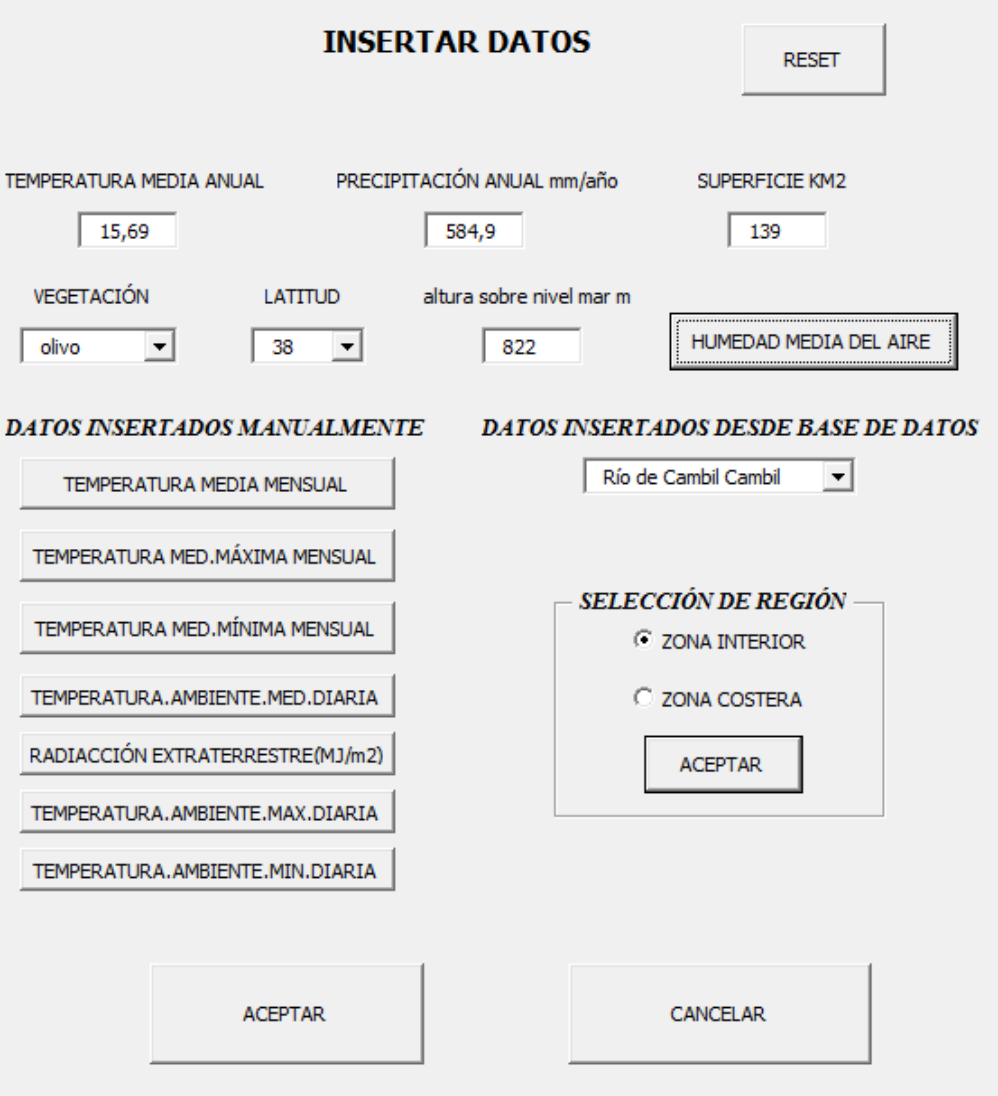


Fig. 102. Panel. Inserción datos 12.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,69
precipitación anual (mm/año)	584,9
superficie (km2)	139
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

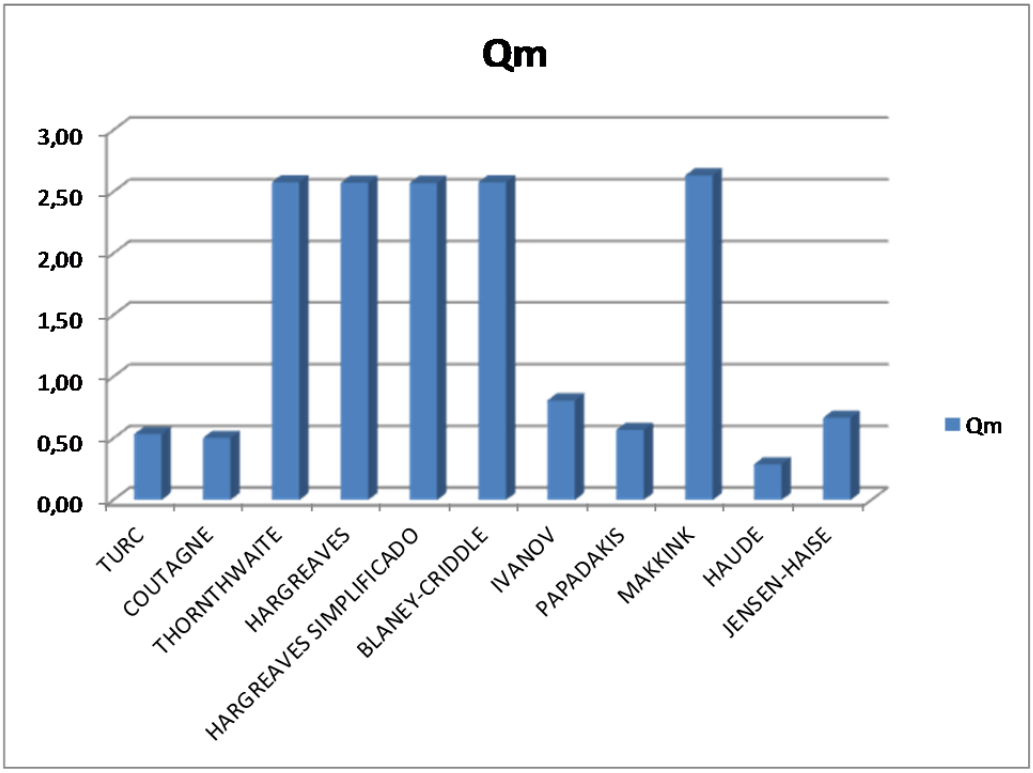
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 55. Datos iniciales de partida de la Central Junta de los Ríos.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,53
COUTAGNE	0,50
THORNTHWAITE	2,58
HARGREAVES	2,57
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,57
BLANEY-CRIDDLE	2,58
IVANOV	0,81
PAPADAKIS	0,57
MAKKINK	2,63
HAUDE	0,29
JENSEN-HAISE	0,67
PENNAN	0,72



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,63**

Tabla 56. Resultados de Caudal de la Central Junta de los Ríos.

11.10.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,806m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,53	33,89
COUTAGNE	0,50	37,59
THORNTHWAITE	2,58	-219,76
HARGREAVES	2,57	-219,02
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,57	-218,98
BLANEY-CRIDDLE	2,58	-219,76
IVANOV	0,81	-0,13
PAPADAKIS	0,57	29,47
MAKKINK	2,63	-226,59
HAUDE	0,29	64,02
JENSEN-HAISE	0,67	17,35
PENNAN	0,72	10,68

Tabla 67. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Junta de los Ríos.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise y Papadakis ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 200%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.11 CENTRAL SAN MANUEL. CAMBIL

Fig. 103. Central San Manuel.

11.11.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cambil, coordenadas UTM (Huso 30): 452.366 , 4.164.544. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

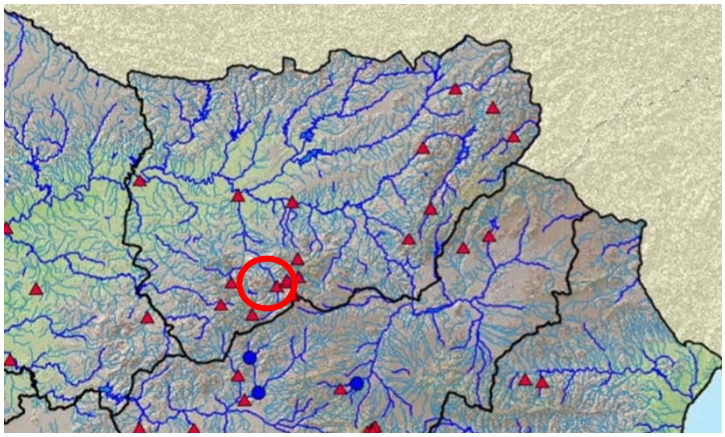


Fig. 104. Situación Central San Manuel.

El río que fluye por su cuenca es el Río Arbuniel.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 8.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,473.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.982 - 2.001.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,50.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,075.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Banki - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 30.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 187,54.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 68,45.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

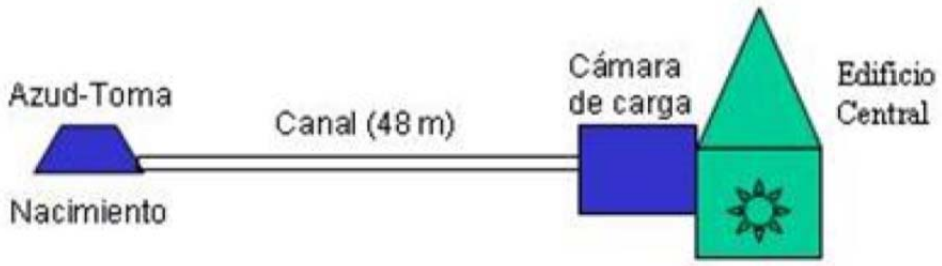


Fig. 105. Esquema Central San Manuel.

Superficie de la Cuenca de Captación: 61,7 km^2.

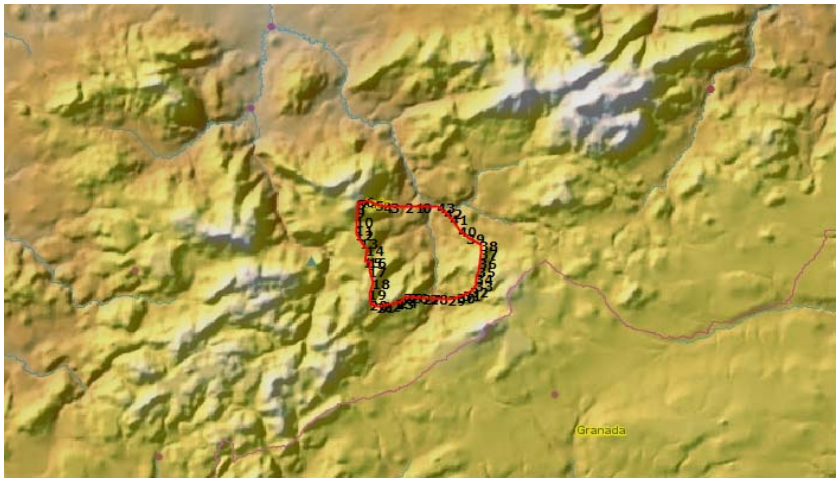


Fig. 106. Cuenca de Captación de la Central San Manuel.

11.11.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

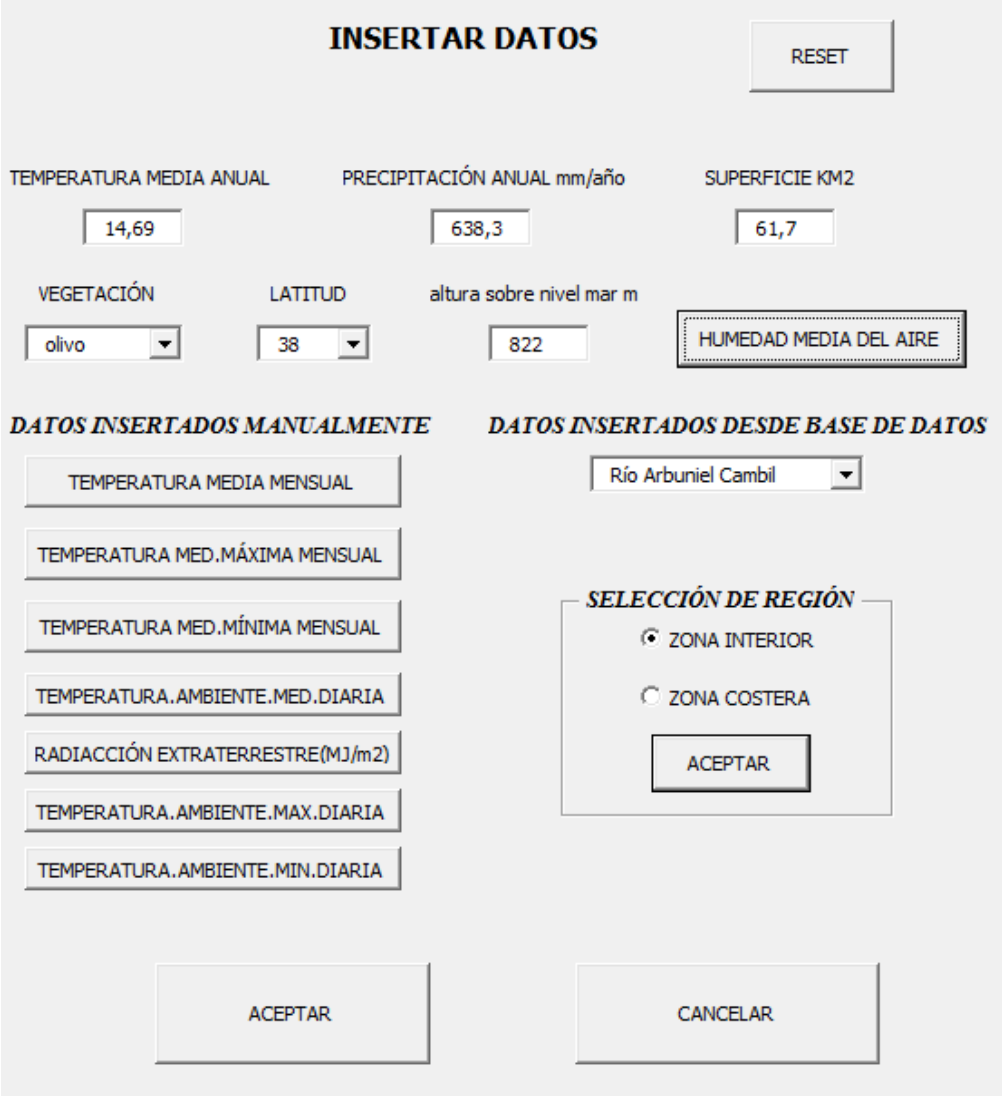


Fig. 107. Panel. Inserción datos 13.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,69
precipitación anual (mm/año)	638,3
superficie (km2)	61,7
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

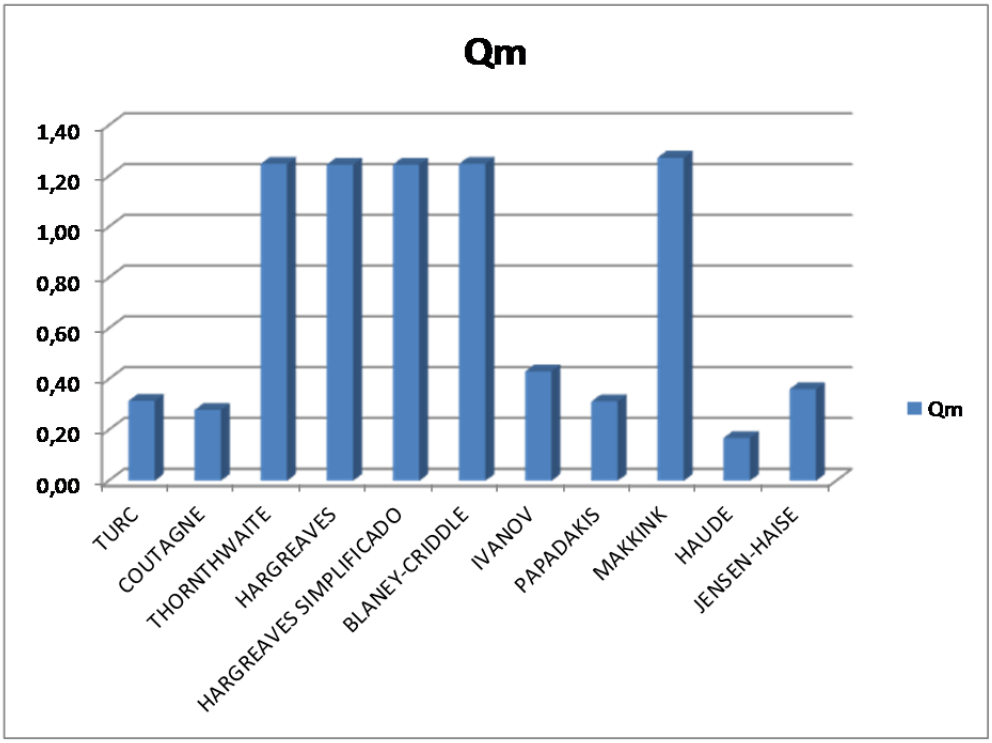
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 58. Datos iniciales de partida de la Central San Manuel.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,31
COUTAGNE	0,28
THORNTHWAITE	1,25
HARGREAVES	1,25
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,25
BLANEY-CRIDDLE	1,25
IVANOV	0,43
PAPADAKIS	0,31
MAKKINK	1,27
HAUDE	0,17
JENSEN-HAISE	0,36
PENNAN	0,39



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,35**

Tabla 59. Resultados de Caudal de la Central San Manuel.

11.11.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,473m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,31	33,55
COUTAGNE	0,28	41,02
THORNTHWAITE	1,25	-163,94
HARGREAVES	1,25	-163,40
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,25	-163,37
BLANEY-CRIDDLE	1,25	-163,94
IVANOV	0,43	8,92
PAPADAKIS	0,31	33,93
MAKKINK	1,27	-169,10
HAUDE	0,17	64,35
JENSEN-HAISE	0,36	23,60
PENNAN	0,39	17,97

Tabla 60. Comparación de Resultados de Caudal de la Central San Manuel.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan y Jensen-Haise ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 170%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.12 CENTRAL ELECTRA GUZMÁN. CAMBIL

Fig. 108. Central Electra Guzmán.

11.12.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cambil, coordenadas UTM (Huso 30): 450.494 , 4.170.478. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

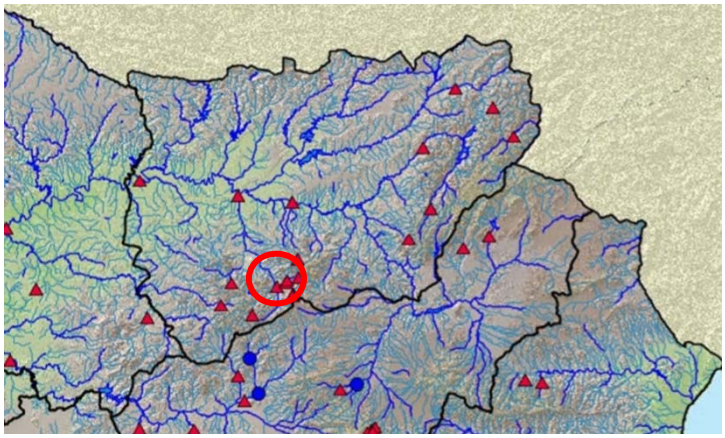


Fig. 109. Situación Central Electra Guzmán.

El río que fluye por su cuenca es el Río Oviedo.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 9,5.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,098.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.982 - 2.002.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,15.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,023.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Banki - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 10.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 47,86.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 17,47.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

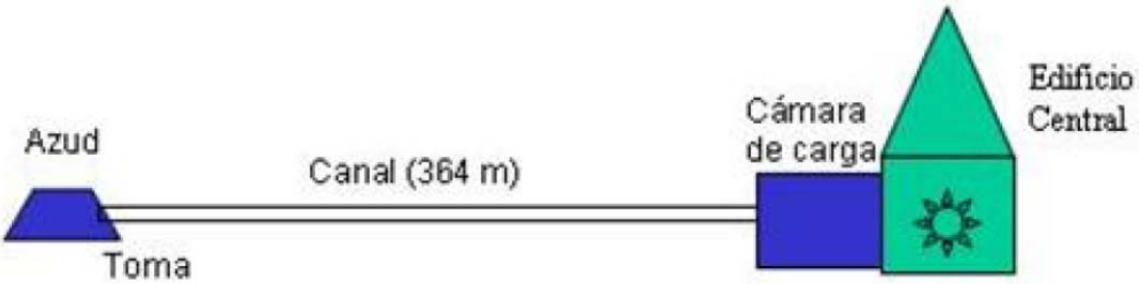


Fig. 110. Esquema Central Electra Guzmán.

Superficie de la Cuenca de Captación: 24,9 km^2.

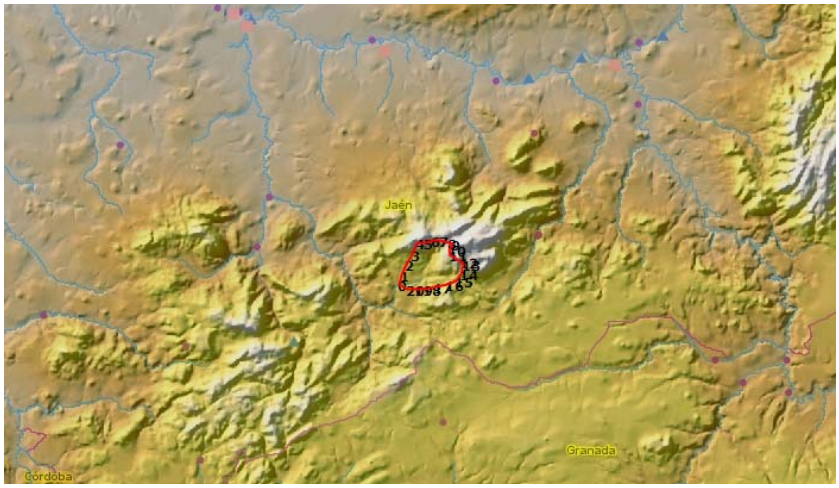


Fig. 111. Cuenca de Captación de la Central Electra Guzmán.

11.12.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

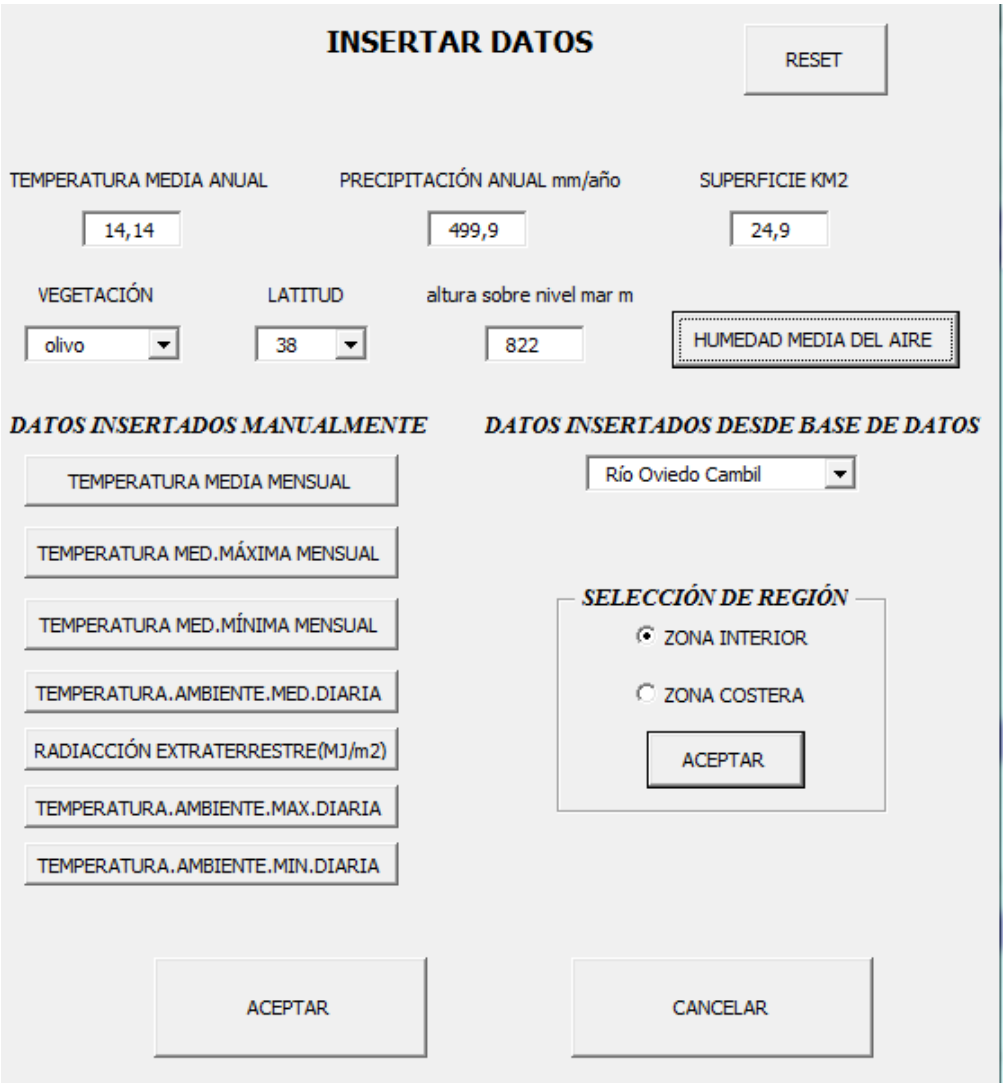


Fig. 112. Panel. Inserción datos 14.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,14
precipitación anual (mm/año)	499,9
superficie (km2)	24,9
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,5483871	7,53571429	10,6451613	12,0666667	16,2580645	23,4333333	25,1290323	24,8387097	20,1666667	14,483871	8,86666667	7,38709677

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
11,3225806	12,96428571	16,1612903	18,13333333	22,74193548	31,2333333	32,80645161	32,38709677	27,16666667	20,41935484	13,63333333	11,96774194

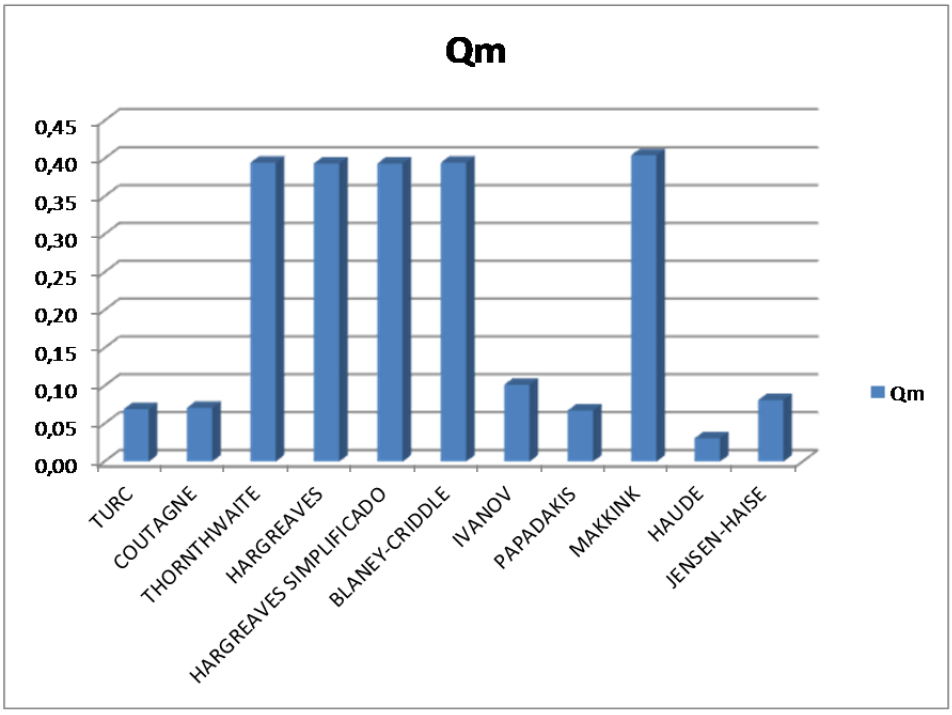
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,32258065	3,071428571	5,90322581	6,333333333	9,935483871	15,9666667	17,09677419	17,38709677	14,06666667	9,935483871	4,833333333	3,741935484

Tabla 61. Datos de partida de la Central Electra Guzmán.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,07
COUTAGNE	0,07
THORNTHWAITE	0,39
HARGREAVES	0,39
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,39
BLANEY-CRIDDLE	0,39
IVANOV	0,10
PAPADAKIS	0,07
MAKKINK	0,40
HAUDE	0,03
JENSEN-HAISE	0,08
PENNAN	0,09



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,09**

Tabla 62. Resultados de Caudal de la Central Electra Guzmán.

11.12.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,098m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,07	29,72
COUTAGNE	0,07	27,59
THORNTHWAITE	0,39	-302,64
HARGREAVES	0,39	-301,61
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,39	-301,55
BLANEY-CRIDDLE	0,39	-302,64
IVANOV	0,10	-3,49
PAPADAKIS	0,07	31,32
MAKKINK	0,40	-312,72
HAUDE	0,03	68,76
JENSEN-HAISE	0,08	17,32
PENNAN	0,09	9,46

Tabla 63. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Electra Guzmán.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, Turc y Coutagne ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 300%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.13 CENTRAL NUESTRA SEÑORA DE TISCAR. QUESADA

Fig. 113. Central Nuestra Señora de Tiscar.

11.13.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Quesada, coordenadas UTM (Huso 30): 497.804 , 4.186.555. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

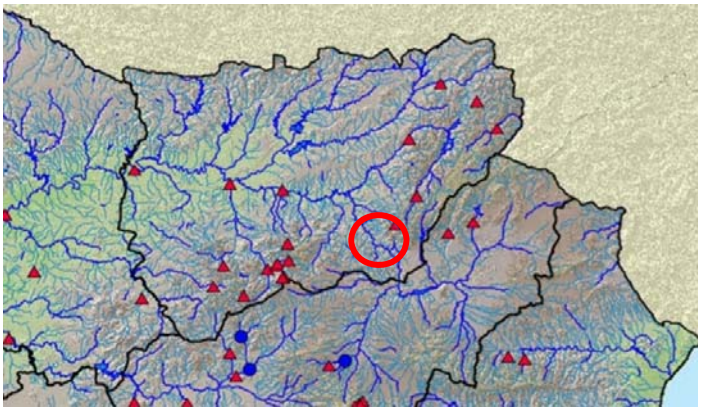


Fig. 114. Situación Central Nuestra Señora de Tiscar.

El río que fluye por su cuenca es el Río Béjar.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 85.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,16.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.984 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,10.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,01.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 60.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 310,44.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 113,31.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

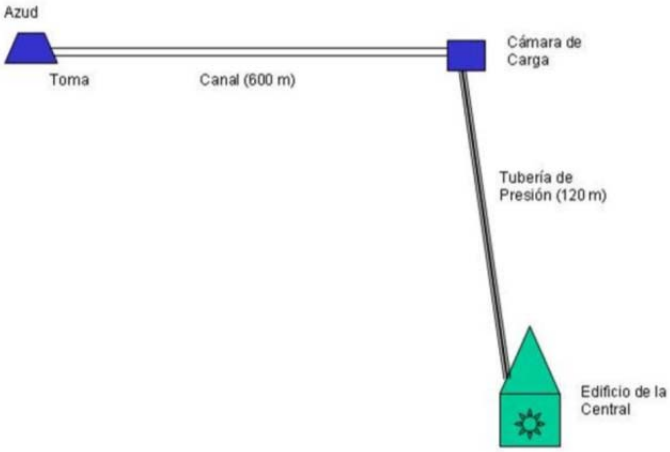


Fig. 115. Esquema Central Nuestra Señora de Tiscar.

Superficie de la Cuenca de Captación: 12,9 km^2.

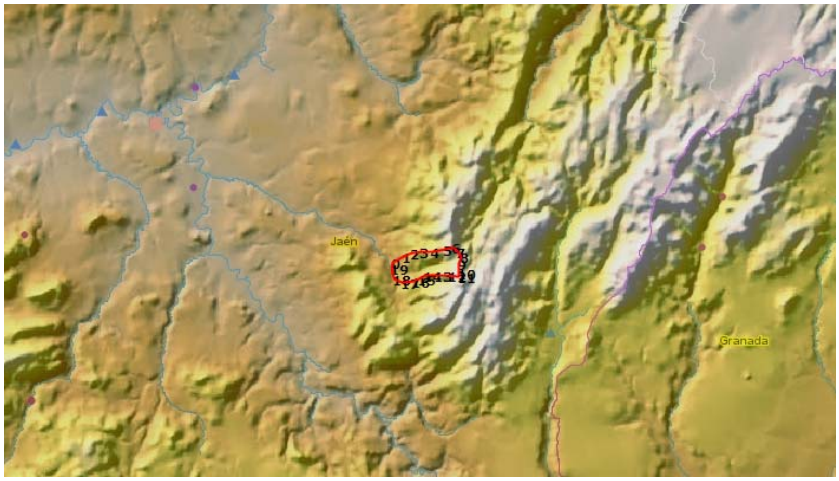


Fig. 116. Cuenca de Captación de la Central Nuestra Señora de Tiscar.

11.13.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

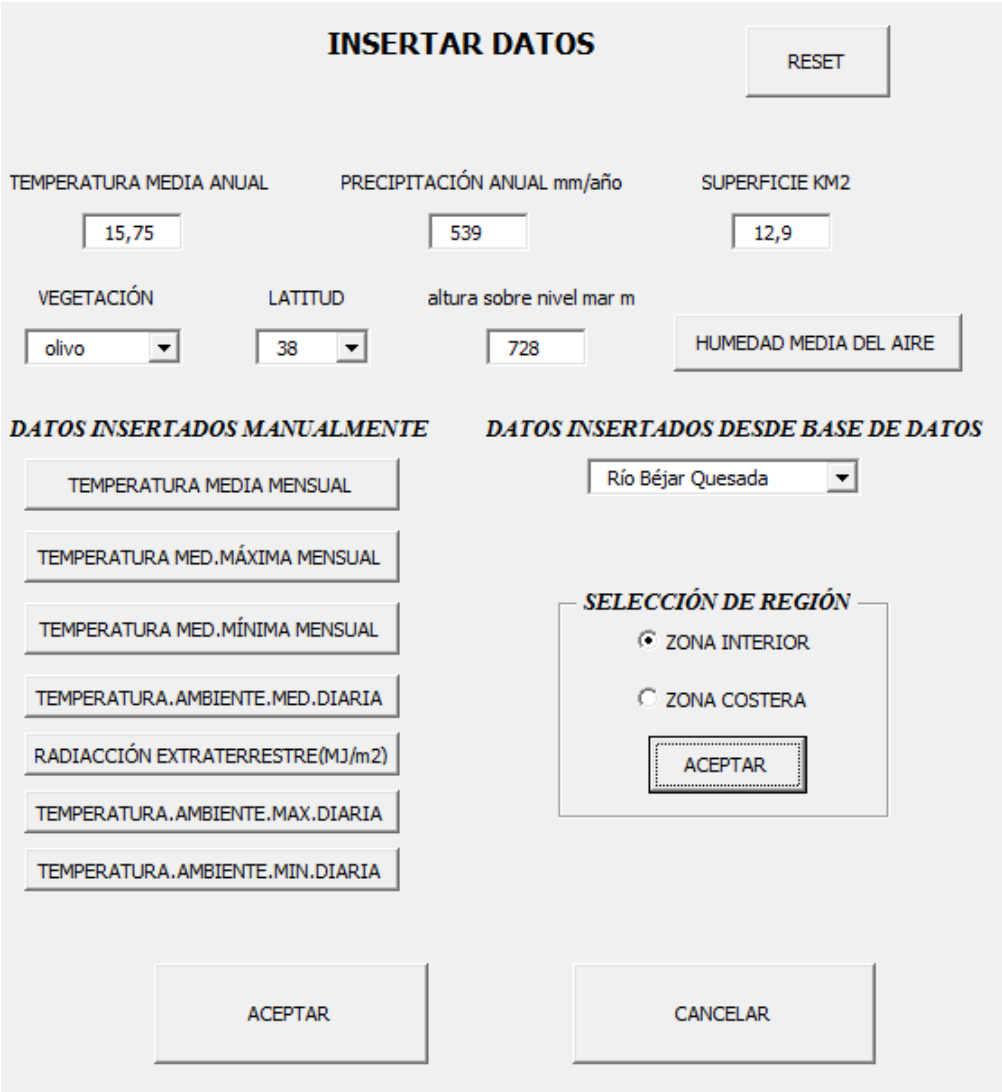


Fig. 117. Panel. Inserción datos 15.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

.

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,75
precipitación anual (mm/año)	539
superficie (km2)	12,9
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,12903226	8,28571429	11,6774194	12,6666667	17,2580645	24,3666667	26,1935484	25,9677419	21,5	15,7741935	9,96666667	8,19354839

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
3,70967742	4,25	7,22580645	7,866666667	11,58064516	17,6333333	18,90322581	19,25806452	15,83333333	11,58064516	6,366666667	5

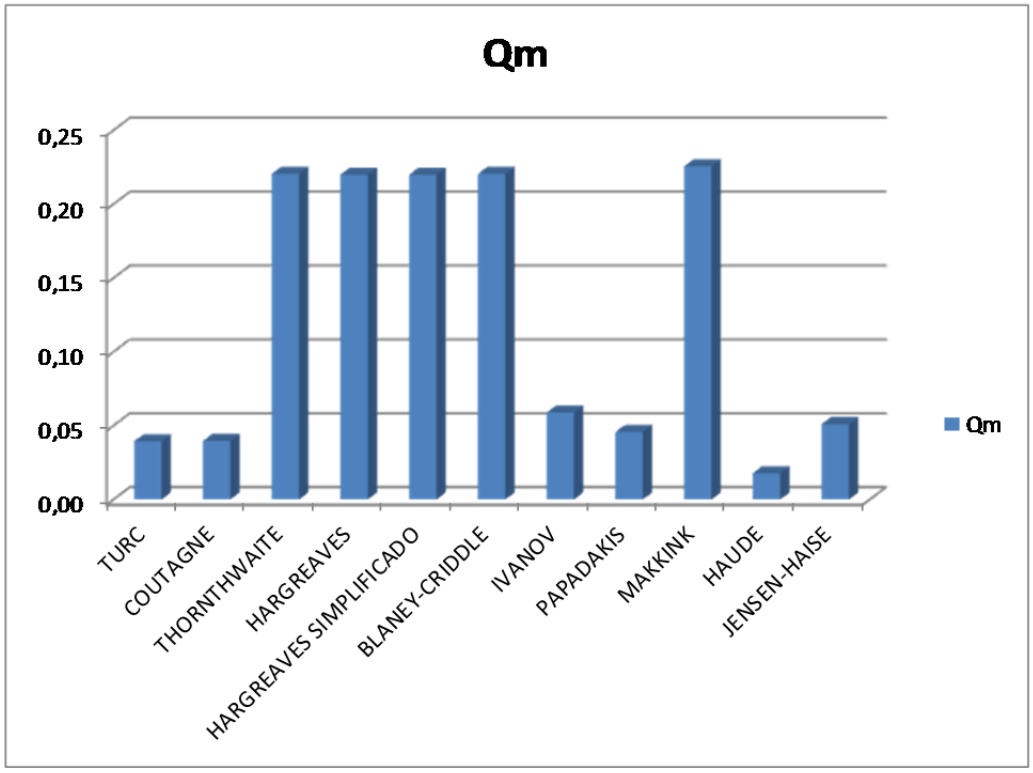
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
10,9677419	13,07142857	16,6451613	17,93333333	23,25806452	31,6	33,25806452	33,03225806	27,76666667	20,83870968	13,76666667	12

Tabla 64. Datos iniciales de partida de la Central Nuestra Señora de Tiscar.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,04
COUTAGNE	0,04
THORNTHWAITE	0,22
HARGREAVES	0,22
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,22
BLANEY-CRIDDLE	0,22
IVANOV	0,06
PAPADAKIS	0,05
MAKKINK	0,23
HAUDE	0,02
JENSEN-HAISE	0,05
PENNAN	0,05



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,11**

Tabla 65. Resultados de Caudal de la Central Nuestra Señora de Tiscar.

11.13.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,16m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,04	75,38
COUTAGNE	0,04	75,29
THORNTHWAITE	0,22	-37,76
HARGREAVES	0,22	-37,46
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,22	-37,44
BLANEY-CRIDDLE	0,22	-37,76
IVANOV	0,06	63,26
PAPADAKIS	0,05	71,48
MAKKINK	0,23	-40,96
HAUDE	0,02	88,89
JENSEN-HAISE	0,05	68,15
PENNAN	0,05	66,60

Tabla 66. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Ntra. Sra. de Tiscar.

En este caso la precisión de nuestra Herramienta de cálculo a disminuido y nos encontramos 5 métodos que nos proporcionan un caudal entorno al 30% pero sin bajar de este porcentaje, serían los métodos de Thornthwaite, Hargreaves, Hargreaves Simplificado, Blaney-Criddle y Makkink.

11.14 CENTRAL CERRADA DEL UTRERO. CAZORLA

Fig. 118. Central Cerrada del Utrero.

11.14.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Cazorla, coordenadas UTM (Huso 30): 506.420 , 4.198.309. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

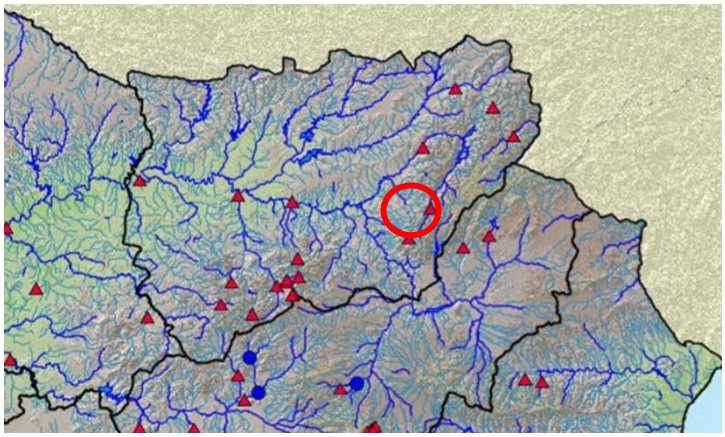


Fig. 119. Situación Central Cerrada del Utrero.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalquivir.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 160.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 1,36.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.984 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,30.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,03.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 375.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 2.434.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 888,41.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

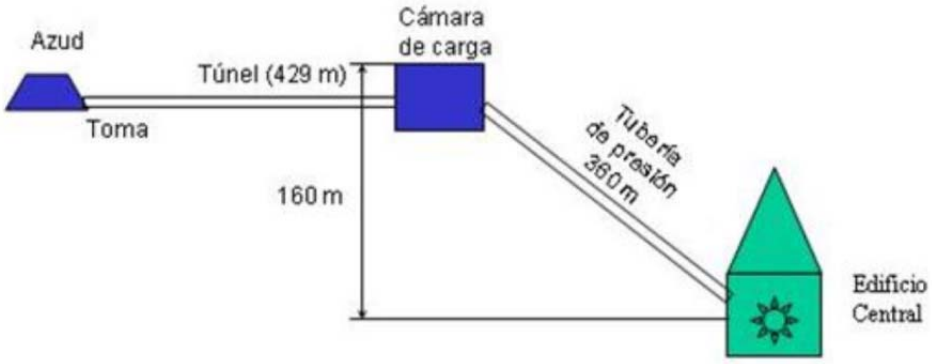


Fig. 120. Esquema Central Cerrada del Utrero.

Superficie de la Cuenca de Captación: 73,2 km^2.

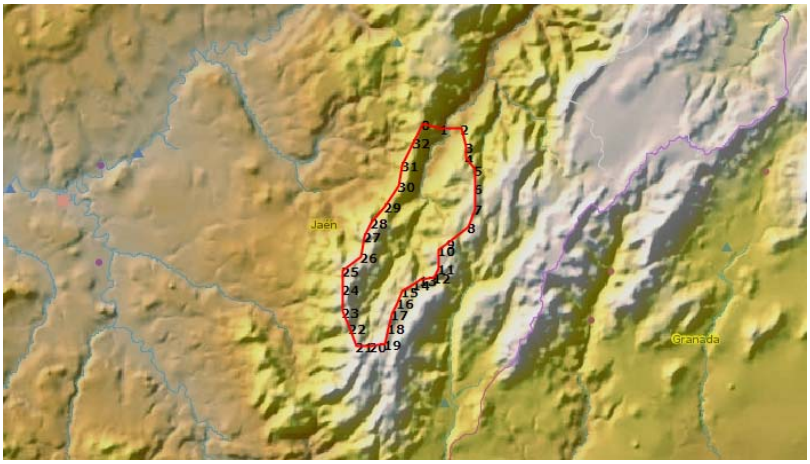


Fig. 121. Cuenca de Captación de la Central Cerrada del Utrero.

11.14.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

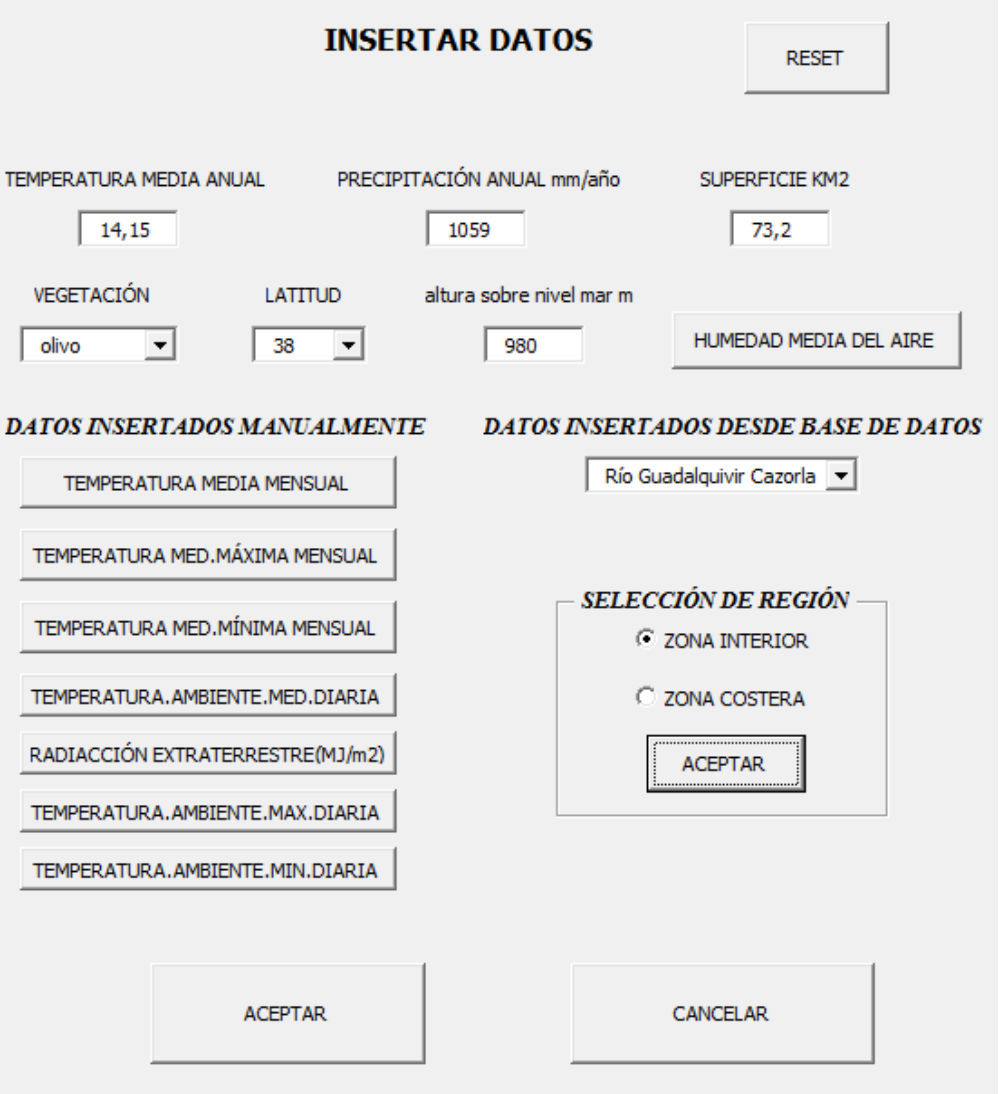


Fig. 122. Panel. Inserción datos 16.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	14,15
precipitación anual (mm/año)	1059
superficie (km2)	73,2
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
5,51612903	6,57142857	10,1290323	11,7666667	16,0322581	22,9333333	24,3870968	24,1935484	19,5666667	14,0645161	8,36666667	6,29032258

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
10,7096774	12,71428571	16,4193548	18,4	22,90322581	30,8	32,4516129	32,25806452	27,1	20,12903226	13,16666667	11,51612903

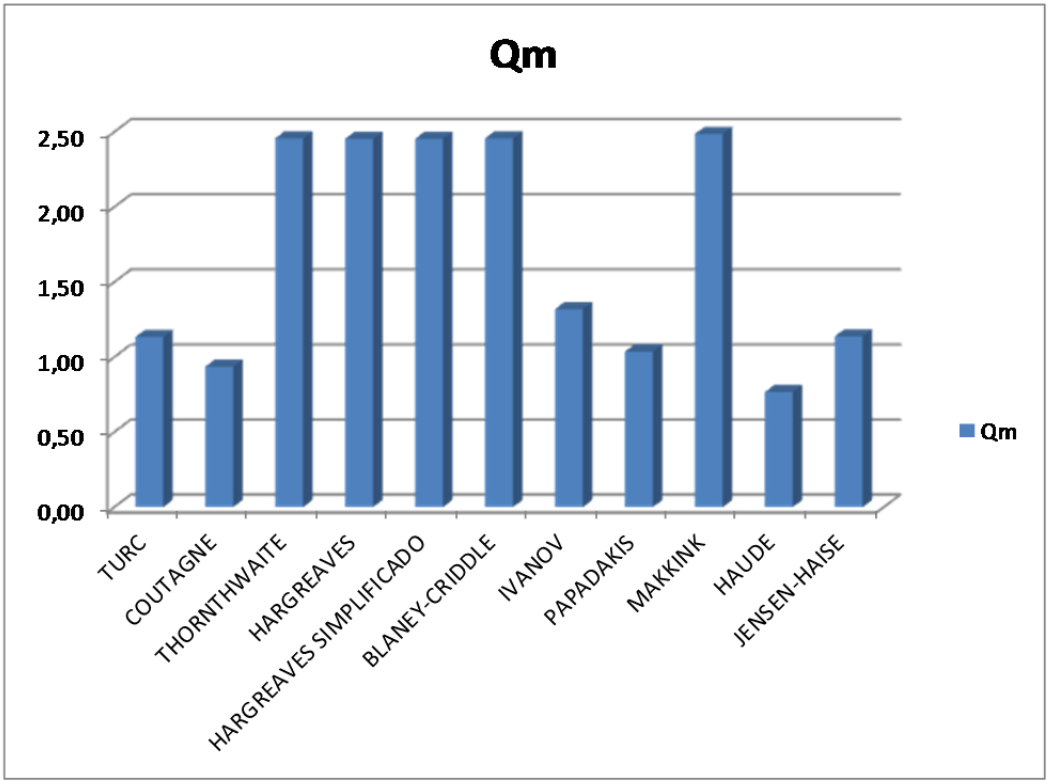
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,06451613	1,428571429	4,96774194	5,366666667	8,967741935	14,4666667	15,48387097	16,06451613	12,83333333	9,193548387	4,233333333	2,225806452

Tabla 67. Datos iniciales de partida de la Central Cerrada del Utrero.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	1,13
COUTAGNE	0,94
THORNTHWAITE	2,46
HARGREAVES	2,45
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,45
BLANEY-CRIDDLE	2,46
IVANOV	1,32
PAPADAKIS	1,04
MAKKINK	2,49
HAUDE	0,77
JENSEN-HAISE	1,14
PENNAN	1,23



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**1,66**

Tabla 68. Resultados de Caudal de la Central Cerrada del Utrero.

11.14.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 1,36m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	1,13	16,66
COUTAGNE	0,94	31,19
THORNTHWAITE	2,46	-80,69
HARGREAVES	2,45	-80,47
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,45	-80,46
BLANEY-CRIDDLE	2,46	-80,69
IVANOV	1,32	3,02
PAPADAKIS	1,04	23,81
MAKKINK	2,49	-82,81
HAUDE	0,77	43,71
JENSEN-HAISE	1,14	16,40
PENNAN	1,23	9,80

Tabla 69. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Cerrada del Utrero.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise, Papadakis y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando al 80% de error, quedando descartados.

11.15 CENTRAL LAS CHOZUELAS. VILLANUEVA DEL ARZOBISPO

Fig. 123. Central Las Chozuelas.

11.15.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Villanueva del Arzobispo, coordenadas UTM (Huso 30): 503.409 , 4.222.249. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

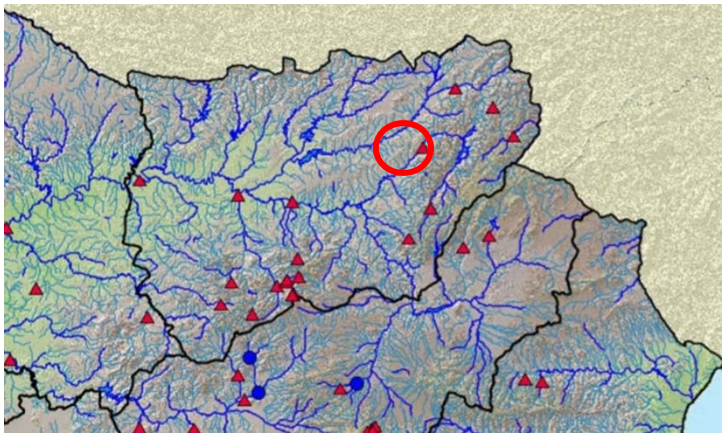


Fig. 124. Situación Central Las Chozuelas.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalquivir.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 6,25.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 7,77.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.931 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 10.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 4.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Semi Kaplan - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 450.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 1.829.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 667,59.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

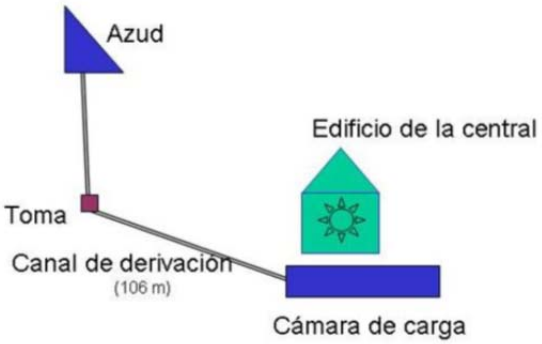


Fig. 125. Esquema Central Las Chozuelas.

Superficie de la Cuenca de Captación: 905 km^2.

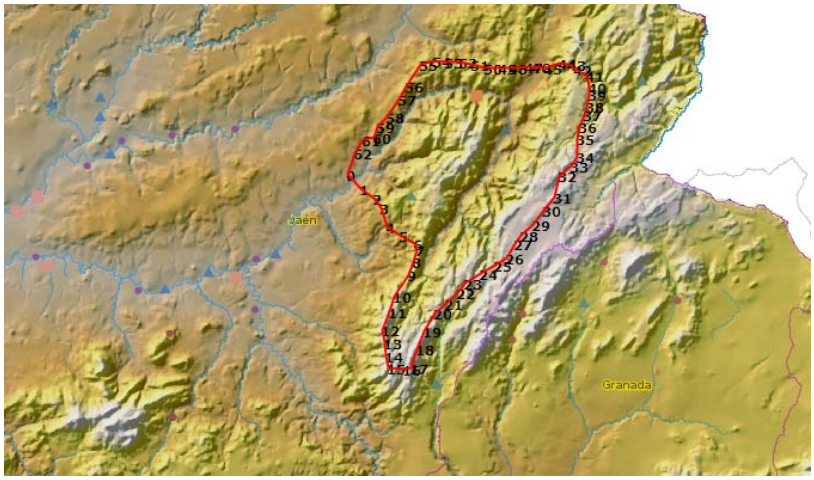


Fig. 126. Cuenca de Captación de la Central Las Chozuelas.

11.15.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

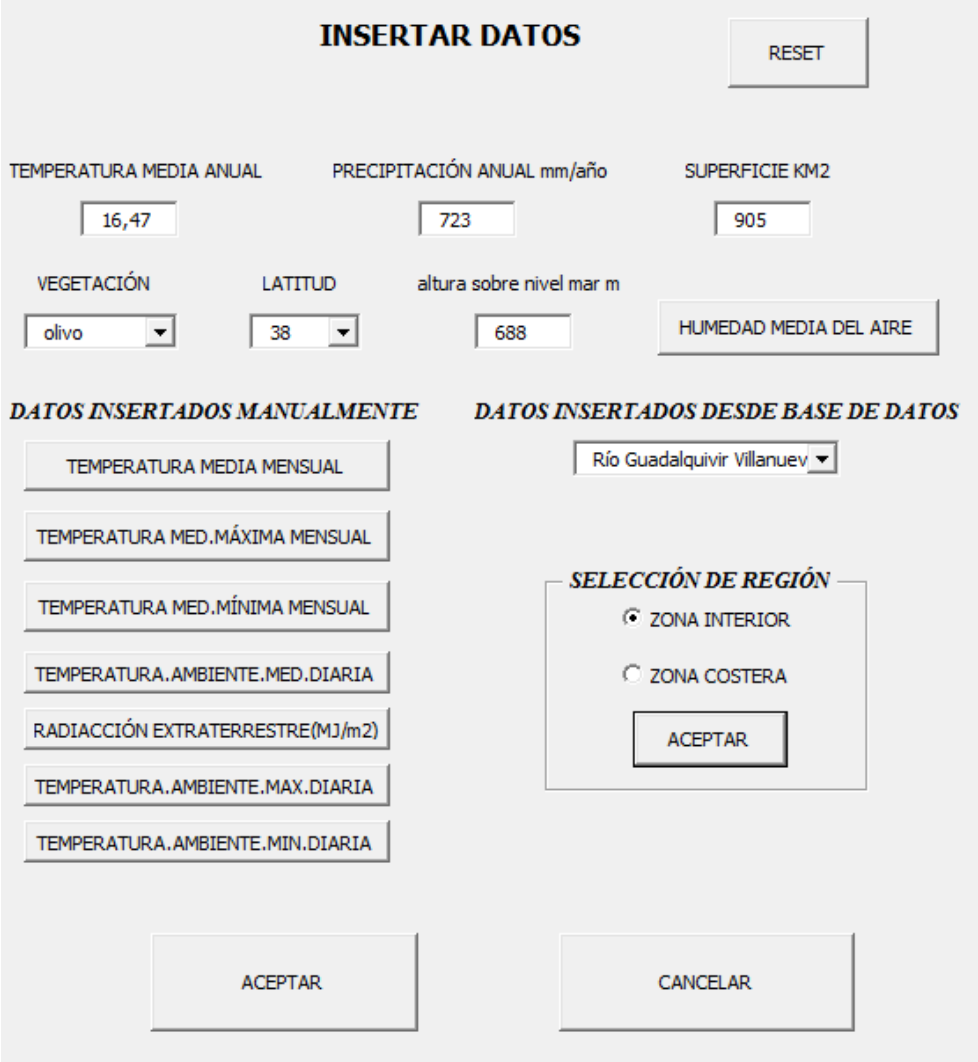


Fig. 127. Panel. Inserción datos 17.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	16,47
precipitación anual (mm/año)	723
superficie (km2)	905
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,38709677	8,64285714	12,3548387	14,1	18,3548387	25,6666667	27,2580645	26,8709677	22	16,3548387	10,4666667	8,19354839

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
13,0322581	14,89285714	18,8387097	20,66666667	25,38709677	33,8333333	35,32258065	34,93548387	29,16666667	22,35483871	15,43333333	13,64516129

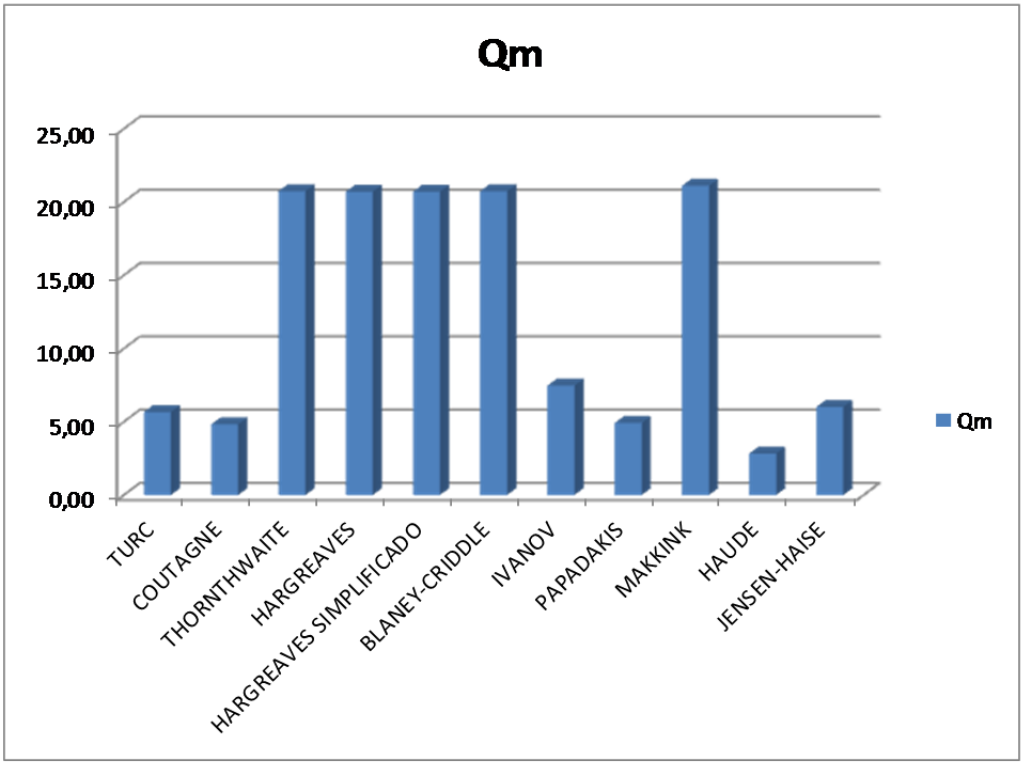
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2,80645161	3,5	6,90322581	8,2	11,80645161	17,4333333	18,77419355	19,22580645	15,86666667	11,4516129	6,433333333	4,064516129

Tabla 70. Datos iniciales de partida de la Central Las Chozuelas.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	5,67
COUTAGNE	4,83
THORNTHWAITE	20,74
HARGREAVES	20,70
HARGREAVES SIMPLIFICADO	20,70
BLANEY-CRIDDLE	20,74
IVANOV	7,47
PAPADAKIS	4,91
MAKKINK	21,10
HAUDE	2,84
JENSEN-HAISE	6,02
PENNAN	7,02



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**5,99**

Tabla 71. Resultados de Caudal de la Central Las Chozuelas.

11.15.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 7,77m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	5,67	27,04
COUTAGNE	4,83	37,86
THORNTHWAITE	20,74	-166,95
HARGREAVES	20,70	-166,43
HARGREAVES SIMPLIFICADO	20,70	-166,40
BLANEY-CRIDDLE	20,74	-166,95
IVANOV	7,47	3,91
PAPADAKIS	4,91	36,80
MAKKINK	21,10	-171,55
HAUDE	2,84	63,49
JENSEN-HAISE	6,02	22,57
PENNAN	7,02	9,71

Tabla 72. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Las Chozuelas.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 160%, quedando estos totalmente descartados.

11.16 CENTRAL LA TOBA. SANTIAGO – PONTONES

Fig. 128. Central La Toba.

11.16.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Santiago - Pontones coordenadas UTM (Huso 30): 538.630 , 4.226.460. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

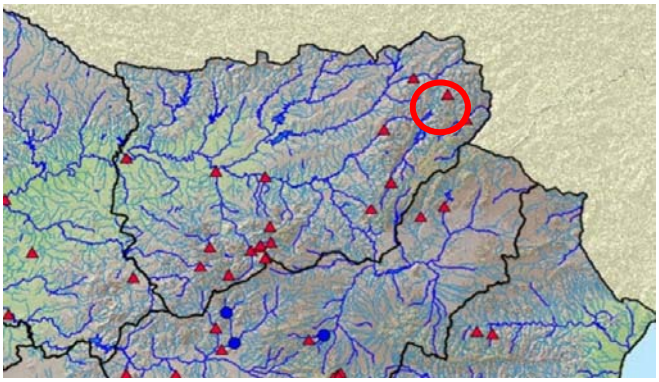


Fig. 129. Situación Central La Toba.

El río que fluye por su cuenca es el Río de la Toba.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 80.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,282.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.990 - .
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,15.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,015.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Pelton - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 80.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 691,2.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 252,3.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

Fig. 130. Esquema Central La Toba.

Superficie de la Cuenca de Captación: 35,9 km^2.

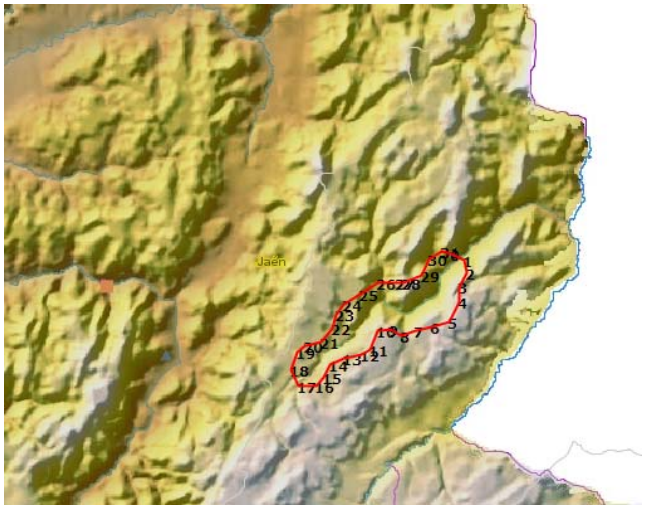


Fig. 131. Cuenca de Captación de la Central La Toba.

11.16.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

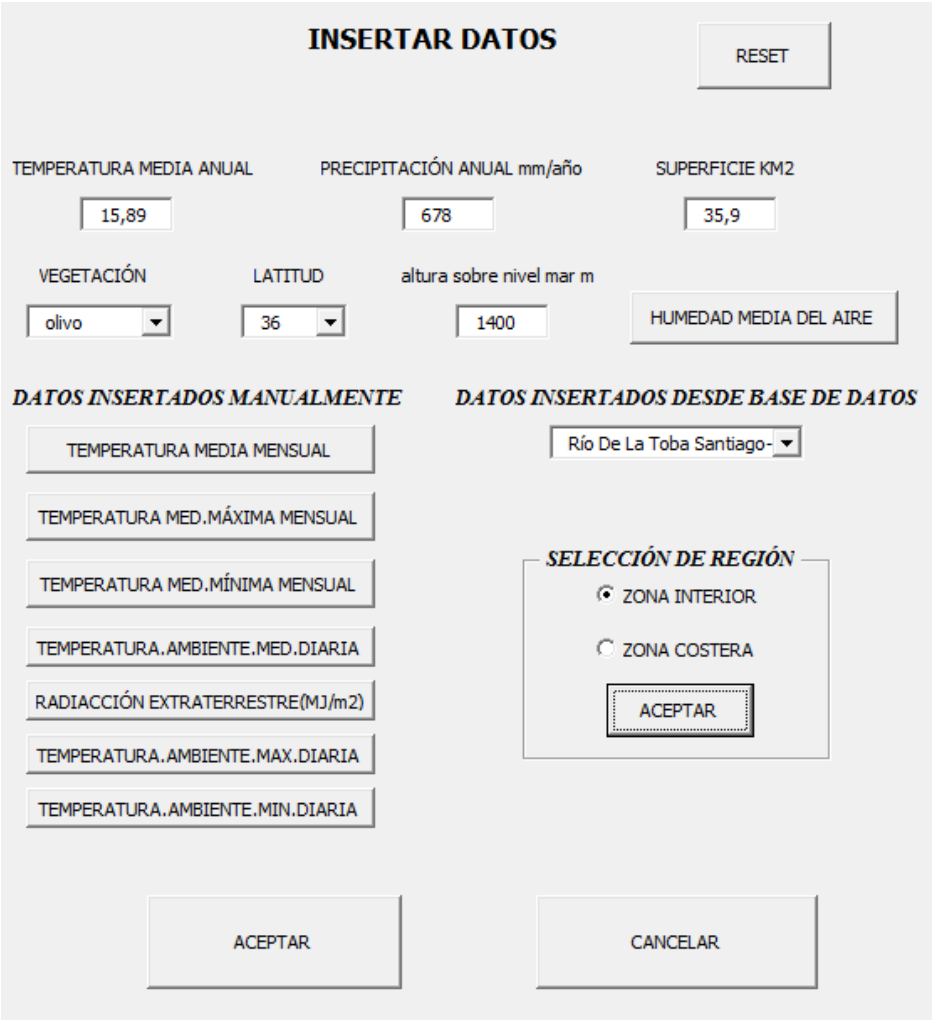


Fig. 132. Panel. Inserción datos 18.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,89
precipitación anual (mm/año)	678
superficie (km2)	35,9
latitud	36
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,99	6,85	8,35	8,85	9,82	9,82	9,09	9,4	8,37	7,85	6,92	6,79

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,74193548	7,78571429	12	13,7666667	18,1935484	25,4333333	26,483871	26,2580645	21,6333333	15,516129	9,73333333	7,35483871

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
13,1935484	15,21428571	19,0322581	21,03333333	25,64516129	34,2666667	35,32258065	35,06451613	29,36666667	22,48387097	15,7	14

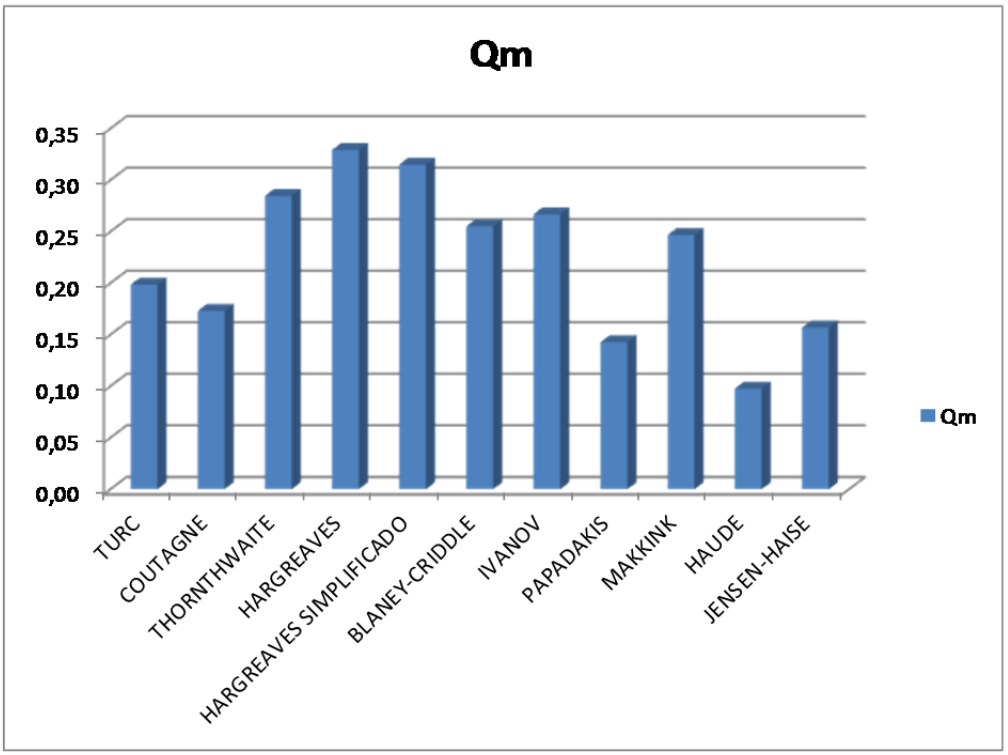
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,19354839	1,178571429	5,61290323	6,433333333	10,16129032	15,3	16,19354839	16,58064516	13,8	9,548387097	4,466666667	1,935483871

Tabla 73. Datos iniciales de partida de la Central La Toba.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,20
COUTAGNE	0,17
THORNTHWAITE	0,28
HARGREAVES	0,33
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31
BLANEY-CRIDDLE	0,26
IVANOV	0,27
PAPADAKIS	0,14
MAKKINK	0,25
HAUDE	0,10
JENSEN-HAISE	0,16
PENNAN	0,24



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,23**

Tabla 74. Resultados de Caudal de la Central La Toba.

11.16.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,282m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,20	29,64
COUTAGNE	0,17	38,67
THORNTHWAITE	0,28	-0,95
HARGREAVES	0,33	-16,72
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31	-11,69
BLANEY-CRIDDLE	0,26	9,54
IVANOV	0,27	5,38
PAPADAKIS	0,14	49,39
MAKKINK	0,25	12,49
HAUDE	0,10	65,39
JENSEN-HAISE	0,16	44,41
PENNAN	0,24	13,23

Tabla 75. Comparación de Resultados de Caudal de la Central La Toba.

Se puede observar cómo los métodos de Thornthwaite, Hargreaves, Hargreaves Simplificado, Blaney-Criddle, Makkink, Ivanov, Pennan y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Quedando solamente excluidos como caudales recomendables los calculados por los métodos de Coutagne, Papadakis, Haude y Jensen-Haise, con un error estos de hasta el 60%.

11.17 CENTRAL TRUJALA. SEGURA DE LA SIERRA

Fig. 133. Central Trujala.

11.17.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Segura de la Sierra, coordenadas UTM (Huso 30): 530.526 , 4.237.842. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

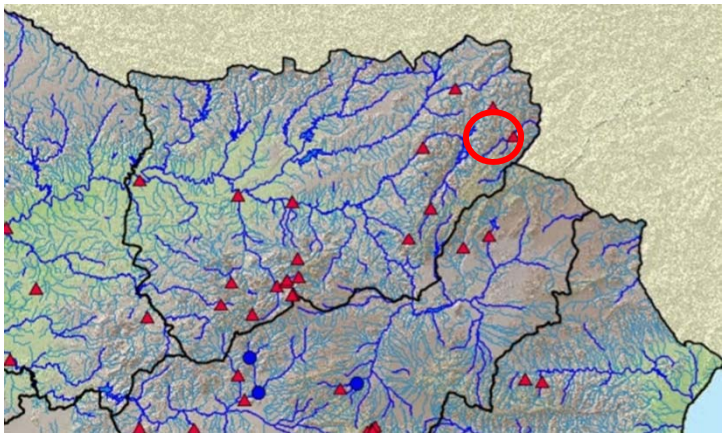


Fig. 134. Situación Central Trujala.

El río que fluye por su cuenca es el Río Trujala.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 7,90.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 0,61.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.983 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 0,20.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,03.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Banki - Generador síncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 12.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 82.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 29,93.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

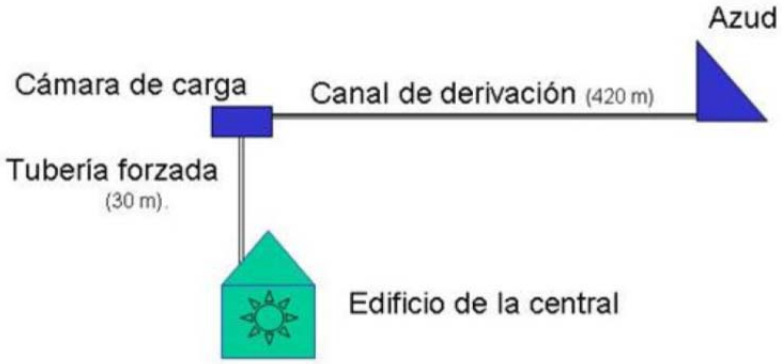


Fig. 135. Esquema Central Trujala.

Superficie de la Cuenca de Captación: 64,8 km^2.

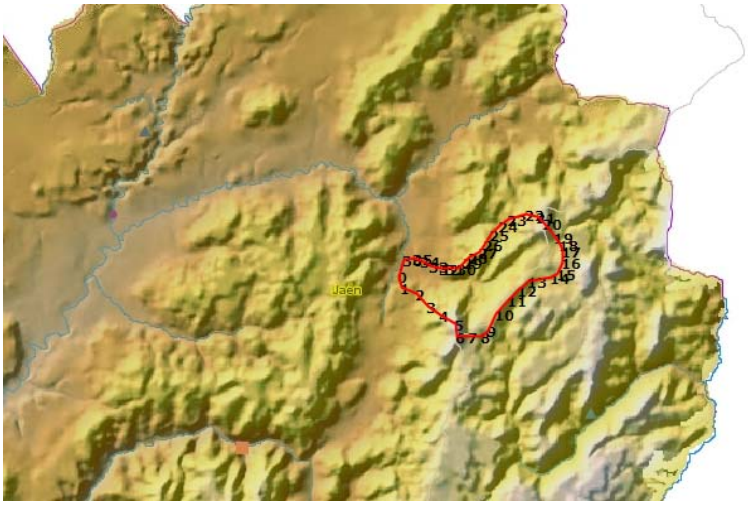


Fig. 136. Cuenca de Captación de la Central Trujala.

11.17.2 Aplicación de la Metodología y Obtención del Caudal Medio Anual

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

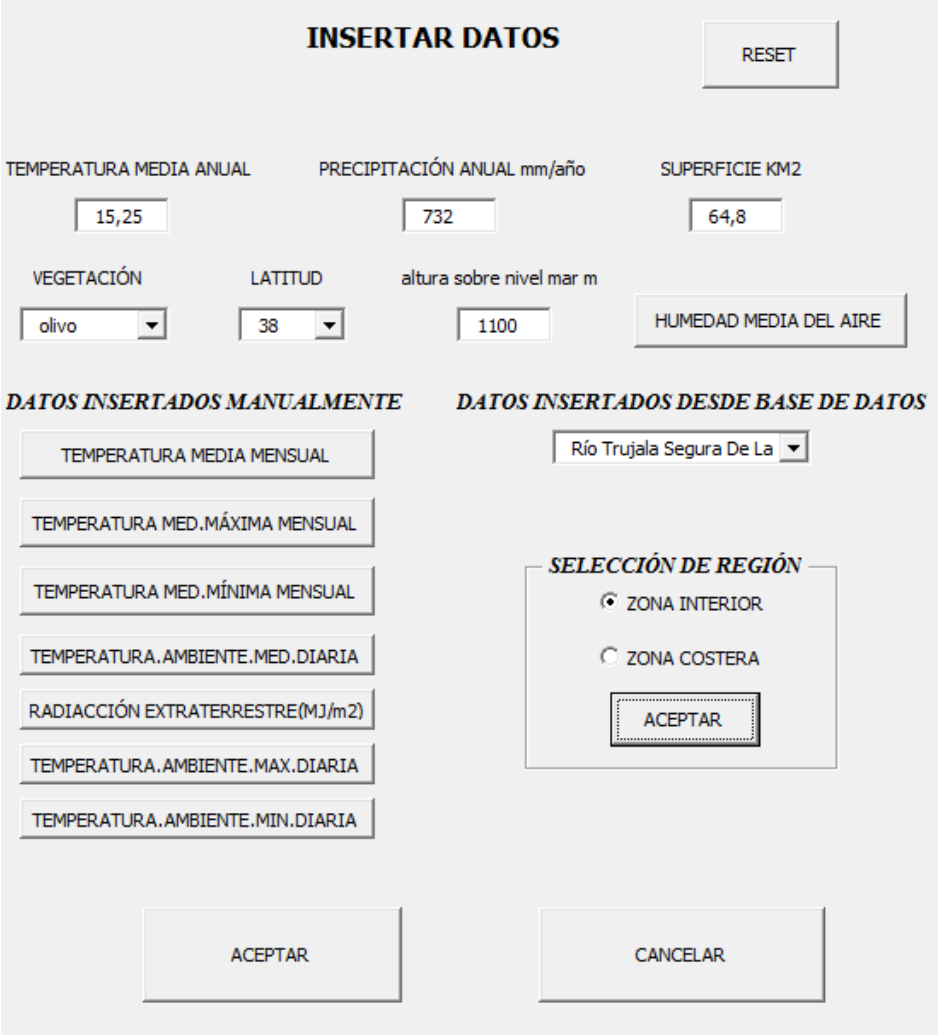


Fig. 132. Panel. Inserción datos 19.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,25
precipitación anual (mm/año)	732
superficie (km2)	64,8
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,74193548	7,78571429	12	13,7666667	18,1935484	25,4333333	26,483871	26,2580645	21,6333333	15,516129	9,73333333	7,35483871

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
13,1935484	15,21428571	19,0322581	21,03333333	25,64516129	34,2666667	35,32258065	35,06451613	29,36666667	22,48387097	15,7	14

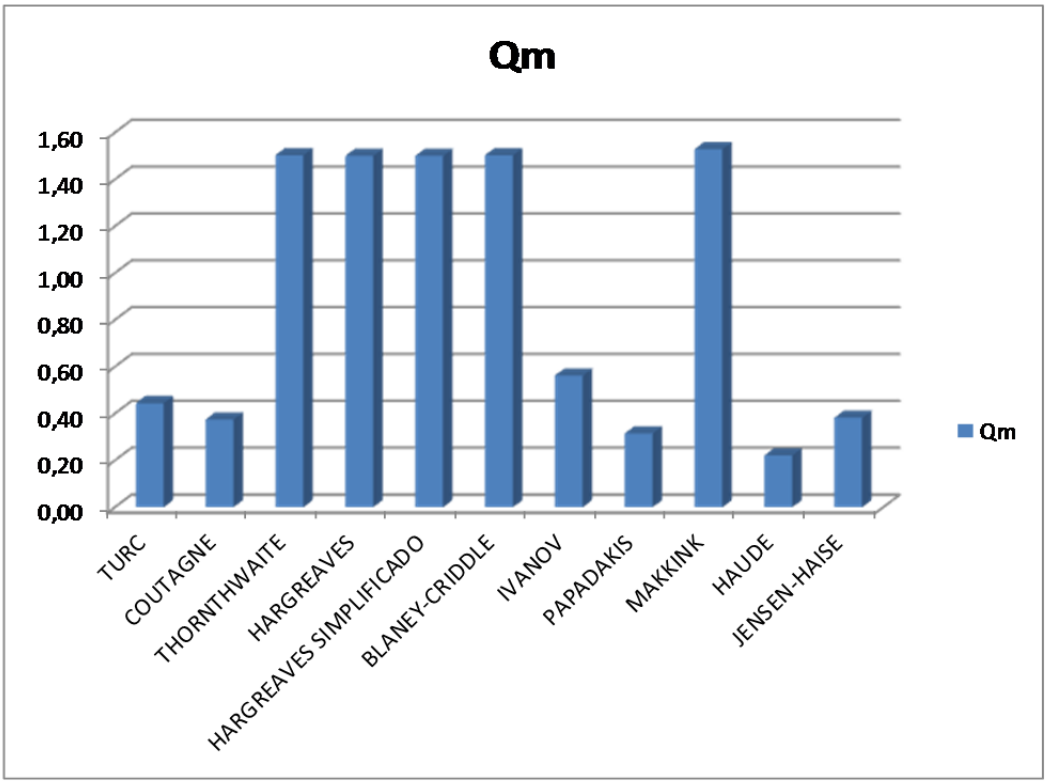
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,19354839	1,178571429	5,61290323	6,433333333	10,16129032	15,3	16,19354839	16,58064516	13,8	9,548387097	4,466666667	1,935483871

Tabla 76. Datos iniciales de partida de la Central Trujala.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	0,44
COUTAGNE	0,38
THORNTHWAITE	1,50
HARGREAVES	1,50
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,50
BLANEY-CRIDDLE	1,50
IVANOV	0,56
PAPADAKIS	0,31
MAKKINK	1,53
HAUDE	0,22
JENSEN-HAISE	0,38
PENNAN	0,52



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**0,46**

Tabla 77. Resultados de Caudal de la Central Trujala.

11.17.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 0,61m3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,44	27,10
COUTAGNE	0,38	38,52
THORNTHWAITE	1,50	-146,50
HARGREAVES	1,50	-146,00
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,50	-145,97
BLANEY-CRIDDLE	1,50	-146,50
IVANOV	0,56	7,81
PAPADAKIS	0,31	48,36
MAKKINK	1,53	-150,70
HAUDE	0,22	63,69
JENSEN-HAISE	0,38	37,44
PENNAN	0,52	14,91

Tabla 78. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Trujala.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan, Jensen-Haise y Turc ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 150%, quedando estos totalmente descartados. Estos resultados se explican porque el caudal real es muy pequeño y cualquier mínima variación dispara el porcentaje de error.

11.18 CENTRAL ELECTRA SAN JUAN. PUENTE DE GÉNAVE

Fig. 138. Central Electra San Juan.

11.18.1 SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL

La central queda emplazada en el término municipal de Puente de Génave, coordenadas UTM (Huso 30): 516.015 , 4.245.105. Su situación en el mapa de la provincia de Jaén queda representada en la siguiente figura:

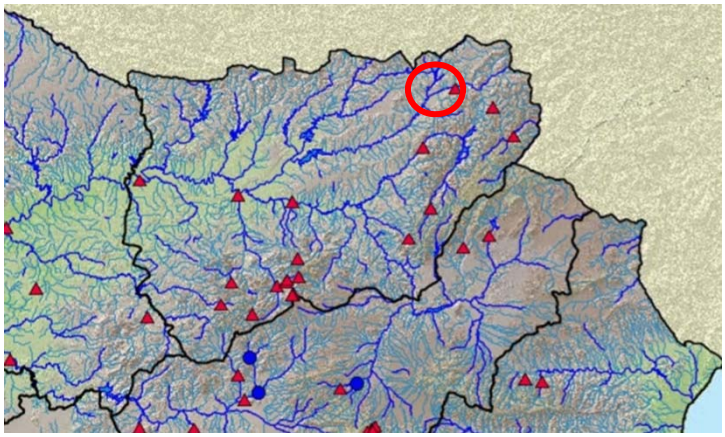


Fig. 139. Situación Central Electra San Juan.

El río que fluye por su cuenca es el Río Guadalimar.

Los datos de diseño son:

- ✓ Salto Neto (m): 7.
- ✓ Caudal Medio Mensual Registrado (m^3/s): 4,65.
- ✓ Periodo de Registro (años): 1.984 - 1.998.
- ✓ Caudal de Equipamiento (m^3/s): 2,40.
- ✓ Caudal Mínimo Turbinable (m^3/s): 0,96.

Las características de la Central son:

- ✓ Tipo de central a instalar: Agua fluyente.
- ✓ Equipamiento a instalar: Turbina Semi Kaplan - Generador asíncrono.
- ✓ Potencia Nominal Instalable (kW): 135.
- ✓ Energía Anual Generada (kWh): 666,23.
- ✓ CO2 Evitado (tCO_2/año): 243,17.

El esquema de la Central queda de la siguiente forma:

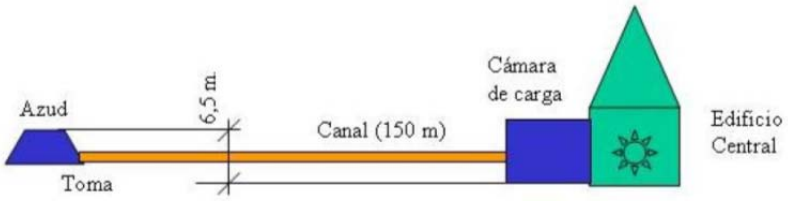


Fig. 140. Esquema Central Electra San Juan.

Superficie de la Cuenca de Captación: 633 km^2.

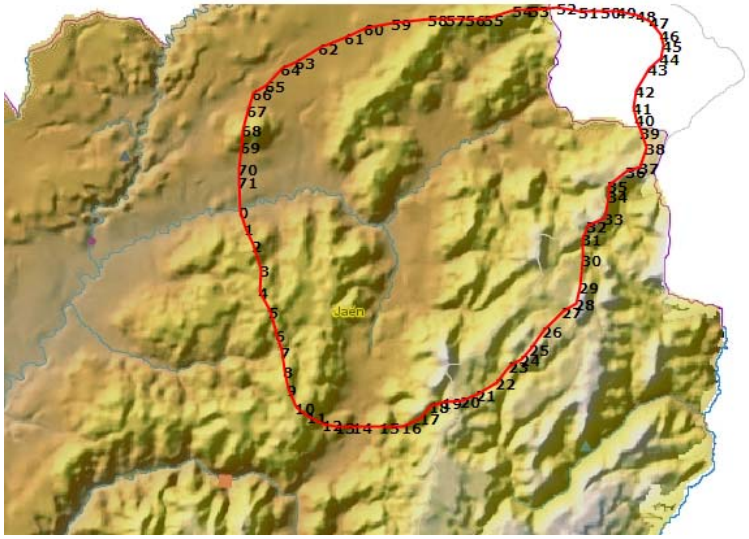


Fig. 141. Cuenca de Captación de la Central Electra San Juan.

11.18.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Se realiza una recopilación de datos como se adjunta al comienzo de este capítulo y procedemos a insertar los datos de partida:

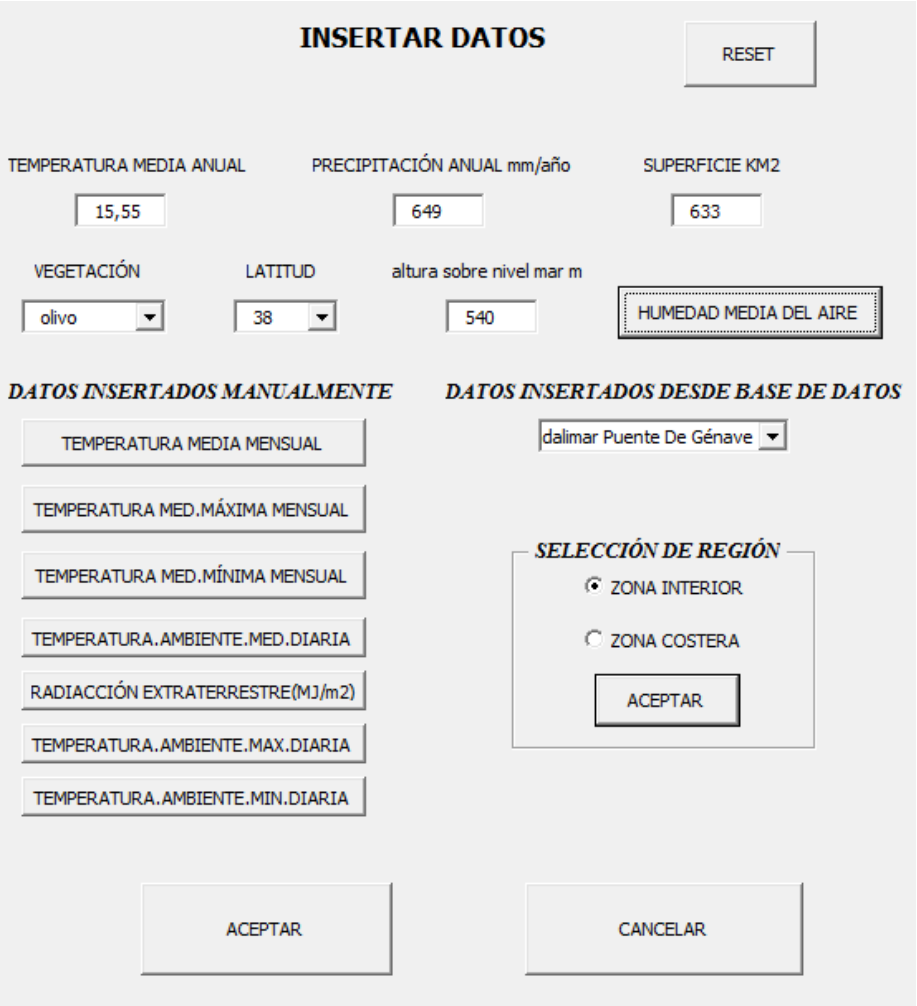


Fig. 142. Panel. Inserción datos 20.

Aquí tenemos el resumen de datos introducidos para el cálculo:

DATOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL	
temperatura media anual (ºC)	15,55
precipitación anual (mm/año)	649
superficie (km2)	633
latitud	38
tipo de vegetación	olivo
Kc	0,6

PORCENTAJE HORAS DE SOL SEGÚN LATITUD

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	6,82	6,66

DURACIÓN MÁXIMA DIARIA DE LAS HORAS DE SOL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
6,74193548	7,78571429	12	13,7666667	18,1935484	25,4333333	26,483871	26,2580645	21,6333333	15,516129	9,73333333	7,35483871

TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
13,1935484	15,21428571	19,0322581	21,03333333	25,64516129	34,2666667	35,32258065	35,06451613	29,36666667	22,48387097	15,7	14

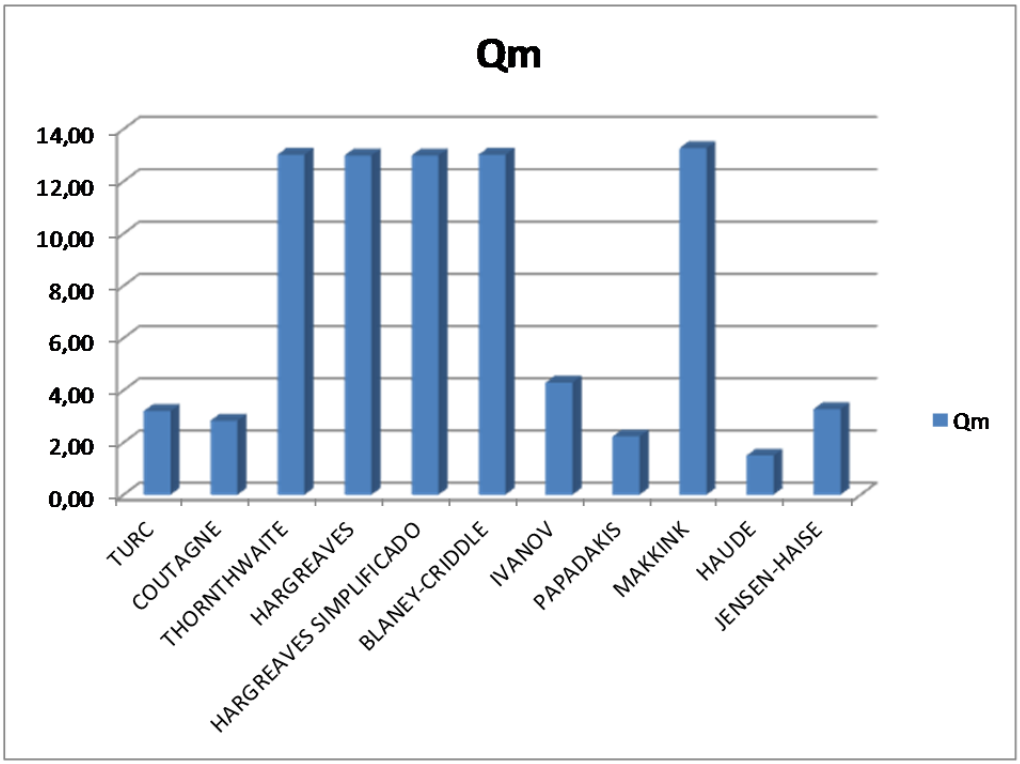
TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA MENSUAL

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,19354839	1,178571429	5,61290323	6,433333333	10,16129032	15,3	16,19354839	16,58064516	13,8	9,548387097	4,466666667	1,935483871

Tabla 79. Datos iniciales de partida de la Central Electra San Juan.

Los resultados obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

MÉTODOS	
TURC	3,20
COUTAGNE	2,84
THORNTHWAITE	13,02
HARGREAVES	12,99
HARGREAVES SIMPLIFICADO	12,99
BLANEY-CRIDDLE	13,02
IVANOV	4,29
PAPADAKIS	2,23
MAKKINK	13,27
HAUDE	1,50
JENSEN-HAISE	3,28
PENNAN	3,92



CAUDAL MEDIO ANUAL RECOMENDABLE (m^3/s)	**3,67**

Tabla 80. Resultados de Caudal de la Central Electra San Juan.

11.18.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Caudal real = 4,65 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	3,20	31,19
COUTAGNE	2,84	38,95
THORNTHWAITE	13,02	-180,06
HARGREAVES	12,99	-179,41
HARGREAVES SIMPLIFICADO	12,99	-179,38
BLANEY-CRIDDLE	13,02	-180,06
IVANOV	4,29	7,64
PAPADAKIS	2,23	51,96
MAKKINK	13,27	-185,45
HAUDE	1,50	67,70
JENSEN-HAISE	3,28	29,46
PENNAN	3,92	15,63

Tabla 81. Comparación de Resultados de Caudal de la Central Electra San Juan.

Se puede observar cómo los métodos de Ivanov, Pennan y Jensen-Haise ofrecen un resultado muy próximo al real. Y sin embargo el resto de métodos superan el 30% de error, llegando incluso al 180%, quedando estos totalmente descartados.

CAPÍTULO 12

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE CAUDALES EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

ÍNDICE

Resumen de resultados **258**
Evaluación de errores **269**

12.1 RESUMEN DE RESULTADOS

Una vez realizada la ´´Herramienta de cálculo para el estudio de caudales en tramos no aforados`` y concluido con dicha herramienta un estudio de caudal sobre centrales de las que ya que conoce el caudal real. Vamos a proceder a comparar los datos de nuestro estudio, para analizar que métodos son los más indicados en cada caso, y finalmente proceder a las recomendaciones a la hora de realizar un estudio de caudal en tramos no aforados. Dichas recomendaciones se propondrá en el siguiente y último capítulo del proyecto, el capítulo ´´CONCLUSIONES``.

Presentaremos tabulados los datos de caudales medios anuales para cada uno de los métodos en las 18 centrales objeto de estudio y posteriormente una tabla con el método que nos ha proporcionado un menor error en los caudales medios anuales de cada una de las 18 centrales, para realizar seguidamente una evaluación de errores comparando los métodos a través de sus porcentajes de error máximos, mínimos y médios

Finalmente este estudio deja como primera conclusión cual es el método para el cálculo de caudal medio anual en la provincia de Jaén, más adelante se llegará a más conclusiones.

Aquí tenemos las tablas con el caudal según cada método para las 18 centrales estudiadas, con el mejor método recalcado.

Central Casas Nuevas. Marmolejo

Caudal real = 56,58 m^3/s		
Método	Caudal medio (m^3/s)	Error (%)
TURC	37,93	32,96
COUTAGNE	33,33	41,10
THORNTHWAITE	54,73	3,27
HARGREAVES	61,55	-8,79
HARGREAVES SIMPLIFICADO	58,69	-3,73
BLANEY-CRIDDLE	49,15	13,13
IVANOV	51,54	8,90
PAPADAKIS	25,37	55,17
MAKKINK	46,36	18,06
HAUDE	18,41	67,46
JENSEN-HAISE	42,39	25,07
PENNAN	47,85	15,44

Tabla 82. Caudales calculados para Central Casas Nuevas. Marmolejo.

Central Nuestra Señora de los Ángeles. Campillo de Arenas

Caudal real =0,23 m^3/s		
Método	Caudal medio (m^3/s)	Error (%)
TURC	0,14	39,23
COUTAGNE	0,13	41,43
THORNTHWAITE	0,70	-202,86
HARGREAVES	0,69	-202,03
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,69	-201,99
BLANEY-CRIDDLE	0,70	-202,86
IVANOV	0,19	18,36
PAPADAKIS	0,08	63,40
MAKKINK	0,71	-209,68
HAUDE	0,06	75,90
JENSEN-HAISE	0,12	46,23
PENNAN	0,17	26,00

Tabla 83. Caudales calculados para Central Nuestra Señora de los Ángeles.

Central Valdepeñas. Valdepeñas de Jaén

Caudal real =1,03 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,76	26,21
COUTAGNE	0,62	39,68
THORNTHWAITE	2,25	-118,65
HARGREAVES	2,25	-118,34
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,25	-118,33
BLANEY-CRIDDLE	2,25	-118,65
IVANOV	0,95	7,41
PAPADAKIS	0,81	21,47
MAKKINK	2,29	-121,94
HAUDE	0,44	57,45
JENSEN-HAISE	0,84	18,62
PENNAN	0,90	12,97

Tabla 84. Caudales calculados para *Central Valdepeñas.*

Central Río Frío. Los Villares

Caudal real = 0,057 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,03	44,95
COUTAGNE	0,04	29,49
THORNTHWAITE	0,29	-400,36
HARGREAVES	0,28	-398,52
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,28	-398,43
BLANEY-CRIDDLE	0,29	-400,36
IVANOV	0,05	6,91
PAPADAKIS	0,02	66,74
MAKKINK	0,29	-414,87
HAUDE	0,01	80,54
JENSEN-HAISE	0,04	37,27
PENNAN	0,05	17,94

Tabla 85. Caudales calculados para *Central Río Frío.*

Central Purísima Concepción. Mengíbar

Caudal real =5,77 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	4,40	23,75
COUTAGNE	3,90	32,40
THORNTHWAITE	17,37	-201,12
HARGREAVES	17,33	-200,39
HARGREAVES SIMPLIFICADO	17,33	-200,36
BLANEY-CRIDDLE	17,37	-201,12
IVANOV	5,54	3,99
PAPADAKIS	2,69	53,32
MAKKINK	17,71	-207,00
HAUDE	1,84	68,16
JENSEN-HAISE	4,35	24,53
PENNAN	5,09	11,84

Tabla 86. Caudales calculados para *Central Purísima Concepción.*

Central Puente del Obispo. Begíjar

Caudal real = 20 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	15,20	24,01
COUTAGNE	12,28	38,58
THORNTHWAITE	45,75	-128,77
HARGREAVES	45,68	-128,40
HARGREAVES SIMPLIFICADO	45,68	-128,38
BLANEY-CRIDDLE	45,75	-128,77
IVANOV	18,86	5,72
PAPADAKIS	14,21	28,97
MAKKINK	46,41	-132,04
HAUDE	8,03	59,87
JENSEN-HAISE	16,51	17,43
PENNAN	18,19	9,05

Tabla 87. Caudales calculados para *Central Puente del Obispo.*

Central Santa Isabel. Torres

Caudal real = 0,0386 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,02	36,79
COUTAGNE	0,02	39,69
THORNTHWAITE	0,04	0,52
HARGREAVES	0,05	-23,78
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,05	-18,10
BLANEY-CRIDDLE	0,03	16,53
IVANOV	0,04	8,00
PAPADAKIS	0,02	36,06
MAKKINK	0,03	27,54
HAUDE	0,01	68,22
JENSEN-HAISE	0,03	25,84
PENNAN	0,03	18,29

Tabla 88. Caudales calculados para *Central Santa Isabel.*

Central Mata Begid. Cambil

Caudal real = 0,096 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,07	29,34
COUTAGNE	0,06	32,81
THORNTHWAITE	0,31	-225,49
HARGREAVES	0,31	-224,75
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31	-224,71
BLANEY-CRIDDLE	0,31	-225,49
IVANOV	0,09	6,40
PAPADAKIS	0,06	35,74
MAKKINK	0,32	-232,97
HAUDE	0,03	68,81
JENSEN-HAISE	0,07	23,82
PENNAN	0,08	17,21

Tabla 89. Caudales calculados para *Central Mata Begid.*

Central San Cayetano. Arbuniel

Caudal real = 0,473 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,32	31,93
COUTAGNE	0,29	39,59
THORNTHWAITE	1,28	-170,36
HARGREAVES	1,28	-169,81
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,28	-169,78
BLANEY-CRIDDLE	1,28	-170,36
IVANOV	0,44	6,71
PAPADAKIS	0,32	32,33
MAKKINK	1,30	-175,65
HAUDE	0,17	63,48
JENSEN-HAISE	0,37	21,75
PENNAN	0,40	15,98

Tabla 90. Caudales calculados para *Central San Cayetano.*

Central Junta de los Ríos. Cambil

Caudal real = 0,806 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,53	33,89
COUTAGNE	0,50	37,59
THORNTHWAITE	2,58	-219,76
HARGREAVES	2,57	-219,02
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,57	-218,98
BLANEY-CRIDDLE	2,58	-219,76
IVANOV	0,81	-0,13
PAPADAKIS	0,57	29,47
MAKKINK	2,63	-226,59
HAUDE	0,29	64,02
JENSEN-HAISE	0,67	17,35
PENNAN	0,72	10,68

Tabla 91. Caudales calculados para *Central Junta de los Ríos.*

Central San Manuel. Cambil

Caudal real = 0,473 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,31	33,55
COUTAGNE	0,28	41,02
THORNTHWAITE	1,25	-163,94
HARGREAVES	1,25	-163,40
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,25	-163,37
BLANEY-CRIDDLE	1,25	-163,94
IVANOV	0,43	8,92
PAPADAKIS	0,31	33,93
MAKKINK	1,27	-169,10
HAUDE	0,17	64,35
JENSEN-HAISE	0,36	23,60
PENNAN	0,39	17,97

Tabla 92. Caudales calculados para *Central San Manuel.*

Central Electra Guzmán. Cambil

Caudal real = 0,098 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,07	29,72
COUTAGNE	0,07	27,59
THORNTHWAITE	0,39	-302,64
HARGREAVES	0,39	-301,61
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,39	-301,55
BLANEY-CRIDDLE	0,39	-302,64
IVANOV	0,10	-3,49
PAPADAKIS	0,07	31,32
MAKKINK	0,40	-312,72
HAUDE	0,03	68,76
JENSEN-HAISE	0,08	17,32
PENNAN	0,09	9,46

Tabla 93. Caudales calculados para *Central Electra Guzmán.*

Central Nuestra Señora de Tiscar. Quesada

Caudal real = 0,16 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,04	75,38
COUTAGNE	0,04	75,29
THORNTHWAITE	0,22	-37,76
HARGREAVES	0,22	-37,46
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,22	-37,44
BLANEY-CRIDDLE	0,22	-37,76
IVANOV	0,06	63,26
PAPADAKIS	0,05	71,48
MAKKINK	0,23	-40,96
HAUDE	0,02	88,89
JENSEN-HAISE	0,05	68,15
PENNAN	0,05	66,60

Tabla 94. Caudales calculados para *Central Nuestra Señora de Tiscar.*

Central Cerrada de Utrero. Cazorla

Caudal real = 1,36 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	1,13	16,66
COUTAGNE	0,94	31,19
THORNTHWAITE	2,46	-80,69
HARGREAVES	2,45	-80,47
HARGREAVES SIMPLIFICADO	2,45	-80,46
BLANEY-CRIDDLE	2,46	-80,69
IVANOV	1,32	3,02
PAPADAKIS	1,04	23,81
MAKKINK	2,49	-82,81
HAUDE	0,77	43,71
JENSEN-HAISE	1,14	16,40
PENNAN	1,23	9,80

Tabla 95. Caudales calculados para *Central Cerrada de Utrero.*

Central Las Chozuelas. Villanueva del Arzobispo

Caudal real = 7,77 m^3/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	5,67	27,04
COUTAGNE	4,83	37,86
THORNTHWAITE	20,74	-166,95
HARGREAVES	20,70	-166,43
HARGREAVES SIMPLIFICADO	20,70	-166,40
BLANEY-CRIDDLE	20,74	-166,95
IVANOV	7,47	3,91
PAPADAKIS	4,91	36,80
MAKKINK	21,10	-171,55
HAUDE	2,84	63,49
JENSEN-HAISE	6,02	22,57
PENNAN	7,02	9,71

Tabla 96. Caudales calculados para *Central Las Chozuelas.*

Central La Toba. Santiago-Pontones

Caudal real = 0,282 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,20	29,64
COUTAGNE	0,17	38,67
THORNTHWAITE	0,28	-0,95
HARGREAVES	0,33	-16,72
HARGREAVES SIMPLIFICADO	0,31	-11,69
BLANEY-CRIDDLE	0,26	9,54
IVANOV	0,27	5,38
PAPADAKIS	0,14	49,39
MAKKINK	0,25	12,49
HAUDE	0,10	65,39
JENSEN-HAISE	0,16	44,41
PENNAN	0,24	13,23

Tabla 97. Caudales calculados para *Central La Toba.*

Central Trujala. Segura de la Sierra

Caudal real = 0,61 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	0,44	27,10
COUTAGNE	0,38	38,52
THORNTHWAITE	1,50	-146,50
HARGREAVES	1,50	-146,00
HARGREAVES SIMPLIFICADO	1,50	-145,97
BLANEY-CRIDDLE	1,50	-146,50
IVANOV	0,56	7,81
PAPADAKIS	0,31	48,36
MAKKINK	1,53	-150,70
HAUDE	0,22	63,69
JENSEN-HAISE	0,38	37,44
PENNAN	0,52	14,91

Tabla 98. Caudales calculados para *Central Trujala.*

Central Electra San Juan. Puente de Génave

Caudal real = 4,65 m³/s		
Método	Caudal medio (m3/s)	Error (%)
TURC	3,20	31,19
COUTAGNE	2,84	38,95
THORNTHWAITE	13,02	-180,06
HARGREAVES	12,99	-179,41
HARGREAVES SIMPLIFICADO	12,99	-179,38
BLANEY-CRIDDLE	13,02	-180,06
IVANOV	4,29	7,64
PAPADAKIS	2,23	51,96
MAKKINK	13,27	-185,45
HAUDE	1,50	67,70
JENSEN-HAISE	3,28	29,46
PENNAN	3,92	15,63

Tabla 99. Caudales calculados para *Central Electra San Juan.*

RESUMEN MEJOR MÉTODO PARA CADA CENTRAL

Central	Caudal Real (m³/s)	Mejor Método	Caudal/Error
Casas Nuevas	56,58	***Thornthwaite***	***54,73 / 3,27%***
Nuestra Señora de los Ángeles	0,23	***Ivanov***	***0,19 / 18,36%***
Valdepeñas	1,03	***Ivanov***	***0,95 / 7,41%***
Río Frío	0,057	***Ivanov***	***0,05 / 6,91%***
Purísima Concepción	5,77	***Ivanov***	***5,54 / 3,99%***
Puente del Obispo	20	***Ivanov***	***18,86 / 5,72%***
Santa Isabel	0,0386	***Thornthwaite***	***0,04 / 0,52%***
Mata Begid	0,096	***Ivanov***	***0,09 / 6,4%***
San Cayetano	0,473	***Ivanov***	***0,44 / 6,71%***

Junta de los Ríos	0,806	***Ivanov***	***0,81 / -0,13%***
San Manuel	0,473	***Ivanov***	***0,43 / 8,92%***
Electra Guzmán	0,098	***Ivanov***	***0,1 / -3,49%***
Nuestra Señora de Tiscar	0,16	***Hargreaves simplificado***	***0,22 / -37,44%***
Cerrada del Utrero	1,36	***Ivanov***	***1,32 / 3,02%***
Las Chozuelas	7,77	***Ivanov***	***7,47 / 3,91%***
La Toba	0,282	***Thornthwaite***	***0,28 / -0,95%***
Trujala	0,61	***Ivanov***	***0,56 / 7,81%***
Electra San Juan	4,65	***Ivanov***	***4,29 / 7,64%***

Tabla 100. Resumen de Resultados.

En la tabla anterior se recogen las 18 centrales minihidráulicas estudiadas, el caudal real fluyente por cada río donde están instaladas y el caudal según el mejor método para cada caso con su error correspondiente.

12.2 EVALUACIÓN DE ERRORES

En la siguiente tabla se muestra el error medio, mínimo y máximo obtenido con cada uno de los métodos al aplicarlo a las 18 centrales analizadas en la provincia de Jaén.

Método	Error Medio (%)	Error Mínimo (%)	Error Máximo (%)
TURC	32,96	16,66	75,38
COUTAGNE	38,97	27,59	75,29
THORNTHWAITE	-152,39	0,52	-400,36
HARGREAVES	-154,74	-8,79	-398,52
HARGREAVES SIMPLIFICADO	-153,84	-3,73	-398,43
BLANEY-CRIDDLE	-150,37	9,54	-400,36
IVANOV	9,37	-0,13	63,26
PAPADAKIS	42,76	21,47	71,48
MAKKINK	-154,22	12,49	-414,87
HAUDE	66,66	43,71	88,89
JENSEN-HAISE	28,74	16,4	68,15
PENNAN	17,37	9,05	66,6

Tabla 101. Evaluación de errores.

De la tabla anterior se deduce que el mejor método para la evolución del caudal medio anual que fluye por un río es el de Ivanov, con un error medio del 9,37%, un error máximo del 63,26% y un error mínimo del 0,13%. Estos valores no hacen más que validar la herramienta de cálculo que se ha utilizado en este Trabajo Fin de Grado.

También tomaremos como válidos los métodos de Pennan, Jensen-haise, Turc y Coutagne. El método de Thornthwaite tiene un error mínimo muy bueno pero su error máximo del 400,36% lo descarta.

Método	Frecuencia Mejor (Vez)	Frecuencia Mejor (%)
Ivanov	14	77,78
Thornthwaite	3	16,67
Hargreaves Simplificado	1	5,56
	18	100,00

Tabla 102. Frecuencia métodos.

En la tabla anterior se observa que de 18 centrales analizadas, con el método de Ivanov se obtiene el mejor caudal en 14 de los casos estudiados, con Thornthwaite en 3 de ellas y con Hargreaves Simplificado en una de ellas. Se verifica el método de Ivanov como el más apropiado para nuestro entorno y Thornwaite aunque es el mejor en 3 de los casos sige descartándose debido a sus ya mencionadas máximas de error.

CAPÍTULO 13

CONCLUSIONES

ÍNDICE

Conclusiones **271**

13 CONCLUSIONES

En este último Capítulo del Trabajo Fin de Grado "Diseño de herramientas de cálculo de minicentales hidroeléctricas en tramos no aforados", se recogen las conclusiones extraídas en la investigación y desarrollo del mismo.

A continuación se citan numeradamente las conclusiones extraídas en este Trabajo:

1. La obtención de un caudal medio anual en cuencas no aforadas se puede desarrollar mediante conceptos sencillos, fiables y con rapidez gracias a nuestra herramienta de cálculo implementada.

2. La herramienta se ajusta por completo al objeto del proyecto y suple una necesidad existente en la materia. Actualmente se encuentra en el mercado alguna herramienta como poder ser el programa ´´Popeye`` que utiliza tres de los métodos incluidos en este proyecto pero modificándolos de tal forma que se adapten a la meteorología y geografía Suiza, de tal modo que solo sean aplicables allí. He aquí una parte del objeto de nuestro proyecto que sería darle un carácter global, por ello se decidió emplear tantos métodos y diversos.

3. La obtención de información para realizar el estudio gracias a los sistemas de información geográfica es rápida y accesible, y los datos que nos proporcionan se ajustan a los requerimientos.

4. Se han implementado todos los métodos importantes de cálculo, se pueden encontrar algunos más, sin embargo el resto de métodos que se recopilaron eran para casos como en la herramienta ´´Popeye`` citada en el punto anterior, zonas muy acotadas de una determinada región y que utilizaban datos difíciles de medir. Los métodos expuestos en el proyecto se pueden encontrar en publicaciones con adaptaciones para zonas concretas, no obstante el objeto del Trabajo Fin de Grado ha sido hacer una herramienta de cálculo transversal que se pueda utilizar en cualquier zona, región o clima.

5. Respecto al caudal recomendable para seleccionar, tenemos que según nuestro estudio de 18 centrales distribuidas para la provincia de Jaén tenemos que Ivanov es el método más preciso con un porcentaje de error medio de 9,37% luego para cualquier punto de la provincia de Jaén se recomiendo escoger el método de Ivanov.

6. Si analizamos un punto cualquiera, tenemos que métodos como Turc o Coutagne nos proporcionaran un caudal que aunque nunca será de gran precisión no tendrá un error grande, con lo cual aquí tenemos una primera posibilidad, también son los métodos más fáciles de obtener, Ivanov es una mejora de Turc y siempre será más preciso que este. Papadakis o Jensen-Haise nos proporcionarán también un caudal aceptable y sus datos son fáciles de obtener. Para zonas con cultivos de temporada Blaney-Criddle se ajusta con bastante precisión. El método de Pennan si disponemos de equipos para la medición de todos los datos será sin duda alguna el más fiable, ya que es el que tiene en cuenta más variables. En nuestro estudio nos ha dado una buena precisión pero los datos no eran medidos sobre el terreno en el punto exacto, son datos sacados de sistemas de información geográfica.

7. Se ha hablado de que método es mejor según las características de la cuenca de captación en la que analicemos el caudal, sin embargo nuestra herramienta debe proporcionarnos, a parte del caudal medio anual según todos los métodos aplicados, un caudal medio anual recomendable, el cual como ya ha sido explicado en el Capítulo 10, descartará los métodos que difieran más de un 60 % de la media para excluir los caudales errores por una posible introducción errónea de datos en dichos métodos o por un fallo de estos. Para calcular finalmente una media con los caudales más próximos entre sí y darnos un caudal recomendable fiable en cualquier situación. En resumen intenta aproximar una media en la zona donde se encuentre mayor concentración de resultados, y como se demuestra en el estudio, el caudal recomendable nos ha proporcionado mejores resultados en la mayoría de los casos y nunca nos ha dado un error superior al 20%.

REFERENCIAS

[1] JOSÉ LLAMAS. ´´Higrología General. Principios y aplicaciones``. Universidad del País Vasco. Editorial: Gaëtan Morin éditeur(Québec, Canada) 1993.

[2] FRANCISCO J.APARICIO. ´´Fundamentos de hidrología de superficie``

[3] C.GUILLERMO BENJAMIN Y J.ALBERTO RODRÍGUEZ. Publicación ´´HIDROLOGÍA SUPERFICIAL`` año 2009. Facultad de ingeniería civil de la universidad UMSNG. Editorial: Limusa. 1992.

[4] ´´GUÍAS METODOLÓGICAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE MÁXIMA CRECIDA ORDINARIA`` CEDEX.

[5] Publicación ´´EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO``, guias para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje. Nº56.

[6]J. Almorox, A. Saa y R. De Antonio. 1994. Metodología para la elaboración de estudios aplicados de Climatología. ETSIA. Monografías de la ETSI Agrónomos.

[7]Página Web: ´´Métodos de determinación de la evotranspiración`` http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Metodos_Determinacion_Evapotranspiracion/Metodos_Determinacion_Evapotranspiracion.asp. Fecha de acceso: 20/4/2015.

[8] Página Web: ´´Plan de energías renovables`` http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_per_2011-2020_def_93c624ab.pdf Fecha de acceso: 28/5/2015.

[9] Página Web: ´´Visualizadores SIG de la Junta de Andalucía``. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.f361184aaadba3cf8ca78ca731525ea0/?vgnextoid=168a7c119370f210VgnVCM2000000624e50aRCRD Fecha de acceso 10/04/2015.

[10] Página Web: ´´Sistema automático de información hidrológica de la cuenca del Guadalquivir`` http://www.chguadalquivir.es/saih/Ayuda.aspx Fecha de acceso: 10/04/2015.

[11] Página Web: ´´Radiacción solar en Andalucía`` https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php Fecha de acceso: 10/04/2015.

[12] Página Web: ´´Centro de estudios geográficos`` CEDEX. http://hercules.cedex.es/general/default.htm Fecha de acceso: 20/04/2015.

[13] Página Web: ´´Potencial mini hidráulico en Andalucía`` https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/empresas/mapa-potencial-minihidraulico-en-andalucia Fecha de acceso: 20/04/2015.

[14] Página Web: ´´Agencia estatal de meteorología``
http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=and&datos=img&w=0&f=humedad Fecha de acceso: 12/04/2015.