

Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales

# ACTORES SOCIALES FRENTE AL DESAFÍO DE LA SUSTENTABILIDAD II

**SANTIAGO MARÍA REYNA**

*Director del Programa*

**SANTIAGO MARÍA REYNA**

**MARTA JULIÁ**

*Editores*



Ministerio de  
**SERVICIOS  
PÚBLICOS**



**UNC**



**FCEyN**

---

# ACTORES SOCIALES FRENTE AL DESAFÍO DE LA SUSTENTABILIDAD II

---

PROYECTOS CONSOLIDAR 2018-2021

**Santiago María Reyna**

**Marta Susana Juliá**

Editores



Ministerio de  
**SERVICIOS  
PÚBLICOS**



# ACTORES SOCIALES FRENTE AL DESAFÍO DE LA SUSTENTABILIDAD II

## **Editores de contenido**

Santiago María Reyna

Marta Susana Juliá

## **Autores**

Marta Susana Juliá - Santiago María Reyna - Mónica Buraschi – Teresa M. Reyna – Pablo Recabarren – Fabián López – Sergio Devalis – Francisco A. Delgadino - María Florencia Peretti - Celina N. Amato - Fabián Fulginiti – María Florencia Bianco - María Lábaque - Rocío Bianchi – Sofía Neyra – Manuel M. Reyna – Magalí Carro Pérez - Rocío Medina – Lourdes I. Marini – Agustina Regali – Federico José Strauss Bertolini - Marco Gauna – Salvador Degano – Cecilia Bertolino

## **Edición de portada y formato**

María Florencia Bianco

*Este libro fue realizado con el aporte económico de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT) y el apoyo a los becarios y sus directores por parte del Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba.*

Se autoriza la reproducción total o parcial de esta obra, para fines educativos u otros fines no comerciales, siempre que se cite la fuente.

Reyna, Santiago María

Actores Sociales Frente al Desafío de la Sustentabilidad II : Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales / Santiago María Reyna ; contribuciones de Marta Susana Juliá... [et al.] ; dirigido por Santiago María Reyna ; editado por María Florencia Bianco. - 1a ed. - Córdoba : Santiago María Reyna, 2021.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-88-0807-9

1. Energía Renovable. 2. Energía Eólica. 3. Energía Geotérmica. I. Juliá, Marta Susana, colab. II. Bianco, María Florencia, ed. III. Título.

CDD 621.042

© 1ª Edición Julio del 2021

Los artículos publicados en este libro han sido transcritos literalmente de los originales enviados por sus autores, siendo de ellos la responsabilidad exclusiva de sus contenidos y redacción.

ISBN 978-987-88-0807-9



9 789878 808079

# ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>15</b>
MAG. ING. PABLO RECABARREN.....	15
<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>19</b>
ING. FABIÁN LÓPEZ, PH.D.....	19
<b><i>ENSAYOS SOBRE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y SUS ACTORES FRENTE A LA SUSTENTABILIDAD</i></b> .....	<b>21</b>
<b>LAS NORMATIVAS Y LOS ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES COMO CONTEXTO PARA SU DESARROLLO EN CÓRDOBA</b> .....	<b>23</b>
SANTIAGO M. REYNA .....	23
<b>LAS ENERGÍAS RENOVABLES: POLÍTICAS, NORMAS, INSTITUCIONES E IMPLEMENTACIÓN EN ARGENTINA</b> .....	<b>33</b>
MARTA S. JULIÁ .....	33
<b>DEMOCRACIA Y POLÍTICAS AMBIENTALES</b> .....	<b>43</b>
FRANCISCO A. DELGADINO .....	43
<b>LA BIOENERGÍA Y LA SUSTENTABILIDAD DE SU CADENA DE VALOR</b> .....	<b>49</b>
MÓNICA BURASCHI, MARÍA FLORENCIA PERETTI, CELINA N. AMATO .....	49
<b>ENERGÍAS RENOVABLES – HIDROELECTRICIDAD DE PEQUEÑA ESCALA</b> .....	<b>55</b>
TERESA M. REYNA .....	55
<b>UN PANORAMA DEL SECTOR DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y SUS REFERENTES</b>	<b>61</b>
SERGIO DEVALIS .....	61
<b><i>ASPECTOS ECONÓMICOS Y TÉCNICOS ASOCIADOS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES</i></b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 1: LA CADENA DE VALOR DEL BIODIÉSEL ARGENTINO</b> .....	<b>73</b>
MGTER. MÓNICA BURASCHI .....	73
INTRODUCCIÓN .....	74
1- ESTRUCTURA DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LA CADENA DEL BIODIÉSEL .....	75
2- ALCANCE GEOGRÁFICO .....	81
3- GOBERNANZA DE LA CADENA DEL BIODIÉSEL .....	84
REFLEXIÓN FINAL .....	86
<b>CAPÍTULO 2: POTENCIAL DE RECURSO EÓLICO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA</b> ...	<b>91</b>

MARÍA FLORENCIA BIANCO, SANTIAGO M. REYNA, MARÍA LÁBAQUE .....	91
INTRODUCCIÓN .....	92
1- DATOS DE RECURSO EÓLICO EN CÓRDOBA .....	94
2- OTROS ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LA LOCALIZACIÓN .....	95
<i>Áreas Naturales Protegidas</i> .....	96
<i>Red vial</i> .....	97
<i>Red eléctrica</i> .....	98
<i>Velocidades de viento a altura apropiada</i> .....	98
<i>Asentamientos humanos</i> .....	103
<i>Bosques cultivados y Reservas Forestales Intangibles</i> .....	104
<i>Cursos y cuerpos de agua</i> .....	105
<i>Área final disponible para uso del recurso eólico</i> .....	106
3- POTENCIAL TEÓRICO MÁXIMO PARA LA PROVINCIA .....	107
<i>Rosas de los vientos en Córdoba</i> .....	107
BREVES REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO .....	111
<b>CAPÍTULO 3: ENERGÍA SOLAR EN ARGENTINA</b> .....	<b>113</b>
MARÍA AGUSTINA REGALI, SANTIAGO M. REYNA, FABIÁN FULGINITI .....	113
INTRODUCCIÓN .....	113
1- TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO ACTIVO .....	114
<i>Conversión a energía térmica</i> .....	114
<i>Conversión a energía eléctrica</i> .....	115
2- BASE DE DATOS DE RECURSO SOLAR .....	116
3- ESTADO DEL ARTE .....	119
<i>Energía solar térmica de baja temperatura: Situación actual</i> .....	119
<i>Energía fotovoltaica: situación Actual</i> .....	121
<i>Aprovechamiento de la energía solar en Argentina</i> .....	123
COMENTARIOS FINALES .....	124
<b>CAPÍTULO 4: BIOGÁS EN ARGENTINA</b> .....	<b>127</b>
ROCÍO MEDINA, SANTIAGO M. REYNA, FABIÁN FULGINITI .....	127
INTRODUCCIÓN .....	128
1- PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA .....	129
2- BIOGÁS .....	130
<i>Aplicación del biogás</i> .....	131
<i>Etapas de la digestión anaeróbica</i> .....	133
<i>Factores que influyen en la producción de biogás</i> .....	135
<i>Tipos de Biodigestores</i> .....	135
<i>Subproducto de la producción de biogás</i> .....	137
3- HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE DEL BIOGÁS .....	138

<i>Situación en Argentina</i> .....	139
<i>Situación en Córdoba</i> .....	146
4- CONCLUSIONES.....	151
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>151</b>
<b>CAPÍTULO 5: ESTADO DEL ARTE DEL BIOETANOL GENERADO A PARTIR DE MAÍZ</b>	<b>153</b>
ROCÍO BIANCHI, SANTIAGO M. REYNA, FABIÁN FULGINITI.....	153
INTRODUCCIÓN .....	154
BIOETANOL Y SU MATERIA PRIMA.....	155
PROCESO DE GENERACIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE MAÍZ.....	160
GENERACIÓN DE BIOETANOL EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA .....	163
BIOCOMBUSTIBLES EN ARGENTINA: MATRIZ ENERGÉTICA Y LEGISLACIÓN ASOCIADA .....	163
CONTEXTO INTERNACIONAL EN MATERIA DE BIOCOMBUSTIBLES .....	166
BREVES REFLEXIONES FINALES.....	169
<b>CAPÍTULO 6: ESTADO DEL ARTE EN EL ÁREA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES, PARTICULARMENTE EN EL BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE LA SOJA</b> .....	<b>171</b>
SOFÍA NEYRA, SANGIAGO M. REYNA, FABIÁN FULGINITI .....	171
INTRODUCCIÓN .....	172
1- BIOENERGÍA.....	175
2- BIODIESEL Y SUS PROPIEDADES.....	176
HISTORIA Y SITUACIÓN ACTUAL DEL BIODIESEL EN ARGENTINA.....	180
1) <i>Modificación ley 26.093</i> .....	181
<i>Proyecto de Ley:</i> .....	182
PRECIO BIODIESEL.....	183
<i>Resolución 1/2021</i> .....	184
SITUACIÓN ACTUAL .....	185
<i>Situación actual en Estados Unidos</i> .....	197
REFLEXIONES FINALES .....	199
<b>CAPÍTULO 7: ETIQUETADO AMBIENTAL EDIFICIO, ESTADO ACTUAL</b> .....	<b>203</b>
LOURDES MARINI, SANTIAGO M. REYNA, FABIÁN FULGINITI.....	203
INTRODUCCIÓN .....	203
CONCEPTOS TÉCNICOS.....	206
<i>Uso y diseño eficiente de viviendas</i> .....	206
<i>Sistemas de etiquetado</i> .....	208
AVANCES EN EL PAÍS .....	211
<i>A nivel Nacional:</i> .....	211
PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	213
CONCLUSIÓN .....	216

**CAPÍTULO 8: MODELADO DE LA EFICIENCIA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA.....219**

MANUEL M. REYNA, MAGALÍ E. CARRO PÉREZ, SANTIAGO M. REYNA.....	219
INTRODUCCIÓN .....	220
<i>Geotermia de baja entalpía</i> .....	220
<i>Bombas de calor</i> .....	221
<i>Bombas geotérmicas con sonda vertical</i> .....	224
<i>Bombas geotérmicas con sonda horizontal</i> .....	226
EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.....	227
<i>Comparación con la eficiencia de calefacción por gas natural</i> .....	227
<i>Comparación con la eficiencia de calefacción por gas licuado de petróleo</i> .....	228
<i>Evaluación del funcionamiento en verano</i> .....	229
MODELO UTILIZADO .....	229
DISCUSIÓN .....	232
<i>Comparación de los rendimientos típicos</i> .....	232
<i>Longitudes óptimas</i> .....	233
<i>Sensibilidad a la conductividad térmica del suelo</i> .....	236
<i>Efectos del clima del sitio</i> .....	237
<i>Separación entre sondas</i> .....	237
CONCLUSIONES .....	238
<i>Dependencia de las características del suelo, las condiciones climáticas y constructivas</i> .....	239
<i>Conclusiones del modelo</i> .....	240
<i>Recomendaciones generales</i> .....	241

**NORMATIVAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....245****CAPITULO 9: EL ANÁLISIS DE LAS POLÍTICAS SOBRE ENERGÍAS RENOVABLES EN LAS LEYES NACIONALES VIGENTES (PANORAMA GENERAL).....247**

DRA. MARTA JULIÁ .....	247
INTRODUCCIÓN .....	248
1- LAS POLÍTICAS Y LA COMPLEJIDAD .....	249
2- LA FORMULACIÓN NORMATIVA SOBRE EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA Y EL DESARROLLO ALCANZADO .....	251
3- LOS ASPECTOS INSTITUCIONALES VINCULADOS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....	255
LAS DIMENSIONES OBJETO DE ANÁLISIS EN LAS LEYES NACIONALES.....	260
LAS VARIABLES OBJETO DE ANÁLISIS EN LAS LEYES SOBRE ENERGÍAS RENOVABLES.....	261
PRINCIPALES REFLEXIONES A PARTIR DEL ANÁLISIS REALIZADO.....	263

**CAPÍTULO 10: ENERGÍA EÓLICA Y NORMATIVAS ASOCIADAS.....267**

MARÍA FLORENCIA BIANCO, MARTA S. JULIÁ, SANTIAGO M. REYNA .....	267
-----------------------------------------------------------------	-----

INTRODUCCIÓN .....	268
1- LEGISLACIÓN NACIONAL .....	268
<i>Ley 24.065: Régimen de la Energía Eléctrica</i> .....	269
<i>Ley 25.019: Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar</i> .....	270
<i>Ley 26.190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica</i> .....	272
<i>Ley 27.191: Modificación del Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica (ley 26.190)</i> .....	274
<i>Ley 27.424: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica</i> .....	275
2- LEGISLACIÓN PROVINCIAL .....	276
<i>Ley 8.810: Las energías renovables y el uso racional de la energía</i> .....	277
<i>Ley 9.229: Ampliación del Acuerdo de Participación en el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Eléctricos Rurales - PERMER</i> .....	277
<i>Ley 10.397: Adhiere la Provincia de Córdoba a la Ley Nacional Nº 26.190 y su modificatoria Nº 27.191 -Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica</i> .....	277
<i>Ley 10.572: Declara de interés provincial el Uso Racional y Eficiente de la Energía</i> .....	277
<i>Ley 10.604: Adhiere Córdoba a la Ley Nacional Nº 27.424 "Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública</i> .....	278
3- PROGRAMAS DE FOMENTO .....	278
<i>RenovAr: Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables</i> .....	278
<i>MaTer: Mercado a Término de Energía Eléctrica de Fuente Renovable</i> .....	279
<i>PERMER: Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales</i> .....	279
<i>GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ENERGÍAS RENOVABLES: Régimen para su fomento</i> .....	280
CERTIFICACIONES Y NORMAS .....	281
<i>Normas Internacionales</i> .....	281
<i>Otras normas enfocadas a la certificación de pequeños aerogeneradores</i> .....	282
<i>Certificación en Argentina</i> .....	282
<i>Organismos certificadores</i> .....	283
BREVES REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO .....	283
<b>CAPÍTULO 11: BIOMASA Y NORMATIVAS ASOCIADAS</b> .....	<b>287</b>
SOFÍA NEYRA, ROCÍO BIANCHI, ROCÍO MEDINA, MARTA S. JULIÁ, SANTIAGO M. REYNA .....	287
INTRODUCCIÓN .....	288

1- LEGISLACIÓN NACIONAL .....	289
<i>Leyes Nacionales y decretos reglamentarios.....</i>	<i>289</i>
<i>Ley Nacional 26.190/06: Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica.....</i>	<i>290</i>
<i>Ley Nacional 26.093/06: Régimen de Regulación y Promoción de la Producción y Uso de Biocombustibles.....</i>	<i>291</i>
<i>Ley Nacional 26.334/07: Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol .....</i>	<i>292</i>
<i>Ley Nacional 27.191/15: Modificación del Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica (ley 26.190) .....</i>	<i>292</i>
<i>Ley Nacional 27.424/17: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública. ....</i>	<i>293</i>
<i>Decretos, resoluciones y normas nacionales .....</i>	<i>294</i>
<i>Decreto 1.738/92: Reglamentación de la Ley N° 24.076 que regula la actividad de transporte y distribución de gas natural como servicio público nacional. ..</i>	<i>294</i>
<i>Resolución 129/01: Definición del Biodiesel. Punto de inflamación. Contenido de azufre máximo, y otras especificaciones. ....</i>	<i>294</i>
<i>Decreto 1.396/01: Plan de Competitividad para el Combustible Biodiesel. Modificaciones al Impuesto sobre los Combustibles Líquidos y el Gas Natural. Normas Complementarias. ....</i>	<i>295</i>
<i>Resolución 1.283/06: Impuesto sobre los combustibles líquidos y el gas natural. Especificaciones que deberán cumplir los combustibles que se comercialicen para su consumo en el territorio nacional. ....</i>	<i>295</i>
<i>Resolución 1.293/08: Mecanismo de selección, aprobación y orden de prioridades de proyectos de producción. Beneficios promocionales del Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles.....</i>	<i>296</i>
<i>Resolución 1.295/08: Especificaciones de calidad que deberá cumplir el bioetanol.....</i>	<i>297</i>
<i>Resolución 1.296/08: Condiciones mínimas que deben cumplir las Plantas de Biocombustibles en relación a la seguridad contra incendio.....</i>	<i>297</i>
<i>Resolución 6/10: Especificaciones de calidad que deberá cumplir el biodiesel. ....</i>	<i>297</i>
<i>Resolución 108/11: Habilitase la realización de Contratos de Abastecimiento entre el Mercado Eléctrico Mayorista y las ofertas de disponibilidad de generación y energía asociada. ....</i>	<i>297</i>
<i>Decreto 543/16: Porcentaje obligatorio de Bioetanol. Abastecimiento. ....</i>	<i>298</i>
<i>Resolución 375/16: Convocatoria a Escuelas Rurales para la Instalación y Uso de Biodigestores. ....</i>	<i>298</i>

Resolución 415/17. ....	298
Resolución 83/18: Regímenes de promoción. Biocombustibles. Ley 26.093. Determinación del precio de adquisición del biodiesel destinado a la mezcla en el mercado interno. ....	299
Norma IRAM 6515-1. ....	299
2- LEGISLACIÓN PROVINCIAL .....	299
Regulación de los sistemas intensivos y concentrados de producción animal (SICPA) .....	299
Ley Provincial 8.810/99: Las energías renovables y el uso racional de la energía. .....	300
Ley Provincial 9.306/06: Regulación de los sistemas intensivos y concentrados de producción animal (SICPA).....	300
Ley Provincial 9.397/07: Promoción de la producción, procesamiento y uso sustentable de biocombustibles en el ámbito del territorio provincial. ....	301
Ley Provincial 10.397/16: Adhesión de la Provincia de Córdoba a la Ley Nacional N° 26190 y su modificatoria N° 27191 -Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica-.....	302
Ley Provincial 10.572/18: Declara de interés provincial el Uso Racional y Eficiente de la Energía. ....	302
Ley Provincial 10.604/19: Adhiere Córdoba a la Ley Nacional N° 27.424 "Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública. ....	303
Ley Provincial 10.721: Ley de promoción y desarrollo para la producción y consumo de biocombustibles y bioenergía.....	303
3- PROGRAMAS DE FOMENTO .....	305
RenovAr: Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. ....	305
PROBIOMASA .....	306
PROBiogas .....	306
PROSAP.....	307
BREVES REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO .....	307
<b>CAPÍTULO 12: ENERGÍA SOLAR Y NORMATIVAS ASOCIADAS .....</b>	<b>311</b>
AGUSTINA REGALI, MARTA S. JULIÁ, SANTIAGO M. REYNA .....	311
INTRODUCCIÓN .....	311
1- LEGISLACIÓN NACIONAL .....	312
Ley 25.019/1998: Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar.....	312
Ley 26.190/2006: Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica .....	314

<i>Ley 27.191/2015: Modificación del Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica (ley 26.190)</i> .....	315
<i>Ley 27.424/2017: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública</i> .....	315
2-    LEGISLACIÓN PROVINCIAL .....	316
<i>Ley 8.810/1999: Las energías renovables y el uso racional de la energía</i> .....	316
<i>Ley 10.573/2018: Sistemas de Aprovechamiento de Energía Solar Térmica de Baja Temperatura para el abastecimiento de Agua Caliente</i> .....	316
<i>Ley 10.572/2018: Declara de interés provincial el Uso Racional y Eficiente de la Energía</i> .....	317
<i>Ley 10.604/2019: Adhesión a Ley Nacional 27.424/2017</i> .....	317
OBSERVACIONES .....	319
<b>CAPÍTULO 13: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y NORMATIVAS ASOCIADAS .....</b>	<b>321</b>
LOURDES MARINI, MARTA S. JULIÁ, SANTIAGO M. REYNA .....	321
INTRODUCCIÓN .....	321
1-    LEGISLACIÓN NACIONAL .....	322
<i>Ley 25.675: Ley general de ambiente y presupuestos mínimos</i> .....	322
<i>Ley 27.424: Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública</i> .....	326
PROYECTO DE LEY: LEY DE EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	326
2-    LEGISLACIÓN PROVINCIAL .....	330
<i>Ley 10.208: Política Ambiental Provincial</i> .....	330
<i>Ley 10.572: “Declaración de interés provincial del uso racional y eficiente de la energía”</i> .....	330
PROYECTO DE LEY: Etiquetado Ambiental Edificio.....	332
OBSERVACIONES .....	333
<b>CAPÍTULO 14: ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA Y NORMATIVAS ASOCIADAS .....</b>	<b>335</b>
MANUEL M. REYNA, MARTA S. JULIÁ, SANTIAGO M. REYNA.....	335
INTRODUCCIÓN .....	336
LEGISLACIÓN NACIONAL.....	337
<i>Constitución Nacional</i> .....	337
<i>Tratados internacionales</i> .....	337
<i>Leyes nacionales sobre ambiente y energía</i> .....	338
LEGISLACIÓN PROVINCIAL .....	338
NORMAS TÉCNICAS ARGENTINAS .....	339
NORMAS EXTRANJERAS DE ESTÁNDARES PARA SISTEMAS DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS .	340

NORMAS EXTRANJERAS DE EFICIENCIA DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN .....	342
PROGRAMAS DE FOMENTO .....	344
<i>Programas vigentes a nivel nacional</i> .....	344
<i>Programas vigentes a nivel provincial</i> .....	345
<i>Aplicación de los programas a la energía geotérmica de baja entalpía</i> .....	345
BREVES REFLEXIONES SOBRE EL CAPÍTULO .....	346
<b>CAPÍTULO 15: MAPA DE ACTORES EN MATERIA DE ENERGÍAS RENOVABLES .....</b>	<b>347</b>
AUTORES: ALUMNOS DE LA MAESTRÍA EN GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES FCEFYN- UNC 2020, MARTA S. JULIÁ .....	347
INTRODUCCIÓN .....	348
LA PROPUESTA DE IDENTIFICACIÓN DE ACTORES (DESCRIPCIÓN).....	349
EL MARCO JURÍDICO, POLÍTICO E INSTITUCIONAL .....	350
LOS ACTORES DE ACUERDO A LOS PROYECTOS .....	352
1- <i>Paneles fotovoltaicos de energía solar para abastecimiento de una     pequeña población</i> .....	352
2- <i>Energía solar térmica</i> .....	354
3- <i>Energía geotérmica de baja entalpía</i> .....	356
SECTOR.....	356
NACIONALES.....	356
PROVINCIALES/LOCALES .....	356
4- <i>Biogás</i> .....	358
5- <i>Biomasa</i> .....	362
6- <i>Eficiencia Energética</i> .....	363
7- <i>Energía Solar Fotovoltaica</i> .....	366
8- <i>Energía eólica</i> .....	370
REFLEXIONES FINALES SOBRE EL CAPÍTULO.....	374
<b>CAPÍTULO 16: IMPLEMENTACIÓN DE LAS POLÍTICAS: EL CASO DEL PROGRAMA DE ENERGÍA RENOVABLE EN MERCADOS RURALES (PERMER).....</b>	<b>377</b>
FEDERICO JOSÉ STRAUSS BERTOLINI, MARTA S. JULIÁ.....	377
INTRODUCCIÓN .....	377
IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA .....	379
EVOLUCIÓN DEL PROGRAMA .....	381
GESTIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL DEL PROYECTO .....	384
REFLEXIONES FINALES .....	385

## CAPÍTULO 8: MODELADO DE LA EFICIENCIA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA

Manuel M. Reyna<sup>51</sup>, Magalí E. Carro Pérez<sup>52</sup>, Santiago M. Reyna<sup>53</sup>

### Resumen

Este capítulo trata sobre potenciales aprovechamientos de la energía geotérmica de baja entalpía en la Provincia de Córdoba. A través de modelaciones se evaluó el desempeño de diversas configuraciones de bombas de calor geotérmicas en la ciudad de Córdoba. Los valores del COP (*Coefficient of Performance*) obtenidos en las modelaciones indican que existen beneficios sustanciales en el uso de bombas de calor en general, en particular bombas de calor geotérmicas. El uso de bombas de calor geotérmico puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de combustibles, la mortalidad por emisiones contaminantes, costos de producción de energía y, en algunos casos, costos para el consumidor. Se reconoció además la dependencia del COP medio anual respecto a variables tales como la configuración de los intercambiadores de calor, los caudales circulados por ellos y la conductividad térmica del suelo.

### Palabras clave

Energía geotérmica. COP. Bombas de calor. Eficiencia.

### Abstract

This chapter deals with potential low enthalpy geothermal energy uses in the Province of Córdoba. The performance of various settings of ground coupled heat pumps in the city of Córdoba was evaluated using computational models. The resulting COP (Coefficient of Performance) values from the models show substantial benefits of the use of heat pumps in general, and ground source heat pumps in particular. Using

---

<sup>51</sup> Ingeniero Civil y Ambiental, FCEfYN, UNC, [manuelmreyna@mi.unc.edu.ar](mailto:manuelmreyna@mi.unc.edu.ar)

<sup>52</sup> Dra. en ciencias de la ingeniería, Ing. Civil, [mcarroperez@unc.edu.ar](mailto:mcarroperez@unc.edu.ar)

<sup>53</sup> Ph.D. en Ingeniería de la Universidad de Purdue; Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Córdoba. [santiagoreyna@unc.edu.ar](mailto:santiagoreyna@unc.edu.ar)

ground source heat pumps can lower greenhouse gases emissions, fuel consumption, mortality associated to air pollution, energy production costs, and, in some cases, energy costs for users. Annual average COP was shown to be dependent on the setting of heat exchangers, fluid flow through them and soil thermal conductivity.

## Introducción

### Geotermia de baja entalpía

Se habla de energía geotérmica tanto para referirse a la energía disponible en el suelo que puede ser intercambiada en forma de calor como para referirse al aprovechamiento por parte del ser humano de esa energía. El calor transferido puede ser aprovechado como tal o puede ser aprovechado acoplando un ciclo termodinámico para obtener trabajo y de él, energía eléctrica.

Del ciclo de Carnot, sabemos que los ciclos termodinámicos para generar trabajo funcionan con mayor eficiencia cuando la relación entre la temperatura de la fuente caliente y la temperatura de la fuente fría es máxima, en el caso del ciclo de Carnot mismo  $\eta = 1 - \frac{T_{fría}}{T_{cal}}$ . Los ciclos reales tienen ecuaciones más complejas para determinar la eficiencia, pero la relación general se mantiene. Por ello, no todos los aprovechamientos geotérmicos son óptimos para generar energía eléctrica: las plantas que funcionan a temperaturas más bajas, las de ciclo binario (que utilizan un ciclo cerrado de fluido de menor temperatura de ebullición que la del agua, que en este caso sólo se utiliza para el transporte del calor desde el suelo y la refrigeración del ciclo), funcionan con temperaturas de entre 100°C y 150°C (Department of Energy, US, 2021). Se considera en general que las energías geotérmicas de media y alta entalpía (o temperatura) son aquellas que pueden generar energía eléctrica, siendo la energía geotérmica de alta entalpía la que permite generación con ciclos convencionales (con las plantas *Dry Steam* y las *Flash*) y la de media entalpía la que utiliza ciclos binarios u otros tipos de ciclos especiales. Si bien a menudo se utiliza el término “baja entalpía” o “baja temperatura” para referirse a aprovechamientos que pueden generar energía eléctrica con ciclos no convencionales (DiPippo, 2004) (Heberle, Preißinger, & Brüggemann, 2012), en este trabajo se opta por utilizarlo únicamente para referirse a formas de aprovechamiento geotérmico que no generan trabajo ni energía eléctrica, otro criterio común (Østergaard & Lund, 2011) (Allen, Milenic, & Sikora, 2003). Más específicamente, nos referimos a energía geotérmica de muy baja entalpía, cuando el calor aprovechado no es anómalo ni proviene del gradiente geotérmico natural con profundidades de cientos de metros (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2005). Por esta última razón, el concepto es semejante al de geotermia somera.

La mayor parte de la Argentina tiene un gradiente geotérmico normal (que se considera en general de unos 25-30 °C/km). También tiene un gradiente normal la totalidad de la Provincia de Córdoba, con excepción del Valle de Traslasierra y la región de las Salinas (que forman el extremo este del dominio magmático convectivo de los Andes) (Gómez, 2019) (Fridleifsson, y otros, 2008). La energía geotérmica de media y alta entalpía en el país tiene potencial para ser aprovechada para la producción de energía eléctrica, para procesos industriales, para usos agrícolas y otros usos probados o novedosos. Sin embargo, 7 de los 10 aglomerados urbanos más grandes del país (incluyendo los 3 más grandes que agrupan un 43% de la población del país) se encuentran en zonas de gradiente geotérmico normal. Por eso, para la mayor parte de la población y la industria, la posibilidad de utilizar energía geotérmica no será en alta ni media entalpía, sino en baja y muy baja entalpía (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2012). En zonas de gradiente normal, los aprovechamientos de baja entalpía requieren de perforaciones muy profundas, del orden de varios cientos de metros hasta los pocos miles de metros, por lo que son factibles de utilizar para aplicaciones a escala importante, como calefacción de distritos y usos recreativos. Así ocurre, por ejemplo, al norte de Alemania, donde el gradiente es cercano al normal y se utilizan perforaciones de más de 1000 m con tales fines (Agemar, Weber, & Schulz, 2014). Para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales pequeñas y medianas, es necesario utilizar instalaciones más apropiadas en escala, por lo que las perforaciones de gran profundidad no son aceptables. Así se opta por aprovechamientos de energía geotérmica de muy baja entalpía o someros.

Los aprovechamientos geotérmicos de muy baja entalpía permiten utilizar la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente para extraer calor del suelo, pero también para entregárselo. De esta manera, pueden ser útiles para aplicaciones de calefacción y de refrigeración, respectivamente. A menudo, la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente no es suficiente para permitir el flujo de calor a las tasas deseadas solamente con intercambiadores de calor, e incluso a veces se desea generar flujo en contra del gradiente. Por eso es muy común ver que aprovechamientos geotérmicos de muy baja entalpía sean asistidos con el uso de bombas de calor.

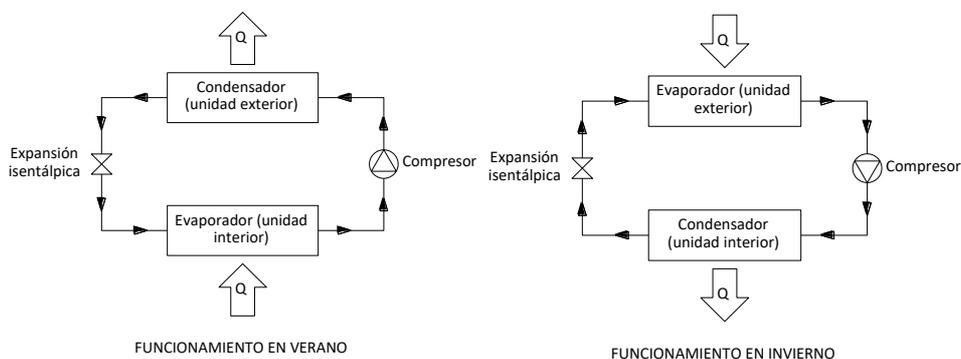
### **Bombas de calor**

Las bombas de calor son máquinas que hacen uso del ciclo refrigerante para mover calor entre un sistema y otro, a menudo en contra del gradiente térmico. El ciclo refrigerante es un ciclo termodinámico compuesto de un conjunto de transformaciones que modifican el estado termodinámico de un fluido llamado refrigerante para lograr la transferencia de calor desde una fuente fría (de menor

temperatura) a una fuente caliente (de mayor temperatura). De esta manera, las bombas de calor consumen trabajo (que en general se obtiene con motores eléctricos) para generar flujos de calor.

Las bombas de calor se utilizan para climatizar edificios y constituyen el elemento central de los sistemas de aire acondicionado. En su operación de invierno, bombean calor hacia el interior de los edificios y en su operación de verano bombean calor hacia afuera del edificio. Con operación de verano o de invierno, no nos referimos exclusivamente al funcionamiento durante esas estaciones, sino al funcionamiento para refrigerar y calefaccionar respectivamente.

En su configuración más usual, los sistemas de aire acondicionado son bombas de calor aerotérmicas, es decir, bombas de calor que utilizan el aire como fuente o sumidero de calor (según se operara en invierno o en verano, respectivamente). Las bombas de calor aerotérmicas son entonces aquellas que tienen en su unidad exterior un intercambiador con el aire. Esta unidad externa es el evaporador de la bomba de calor o el condensador según la forma en la que se opere, como se observa en la Figura 64.



*Figura 64 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor aerotérmica*

El funcionamiento reversible es el que permite a las bombas de calor funcionar tanto en verano como en invierno. Para lograrlo, ellas utilizan una válvula de inversión de cuatro vías que lleva el refrigerante que sale del compresor a la unidad externa o interna (funcionando ella como condensador) y el refrigerante que sale de la válvula de expansión isoentálpica a la otra unidad (funcionando esta como evaporador) (Chiasson, 2016).

Las bombas de calor geotérmicas reemplazan el intercambio de calor con el aire en la unidad exterior por intercambio de calor con el suelo. En la Figura 65 se observa que

se ha agregado un nuevo ciclo al sistema. En este ciclo el fluido no sufre transformaciones termodinámicas, más allá de transferencias de calor a presión constante que ocurre sin cambio de fase. El fluido funciona como vehículo del calor que es intercambiado con el suelo a lo largo de toda la sonda y con la unidad externa de la bomba de calor (evaporador o condensador según el caso) en un intercambiador de calor.

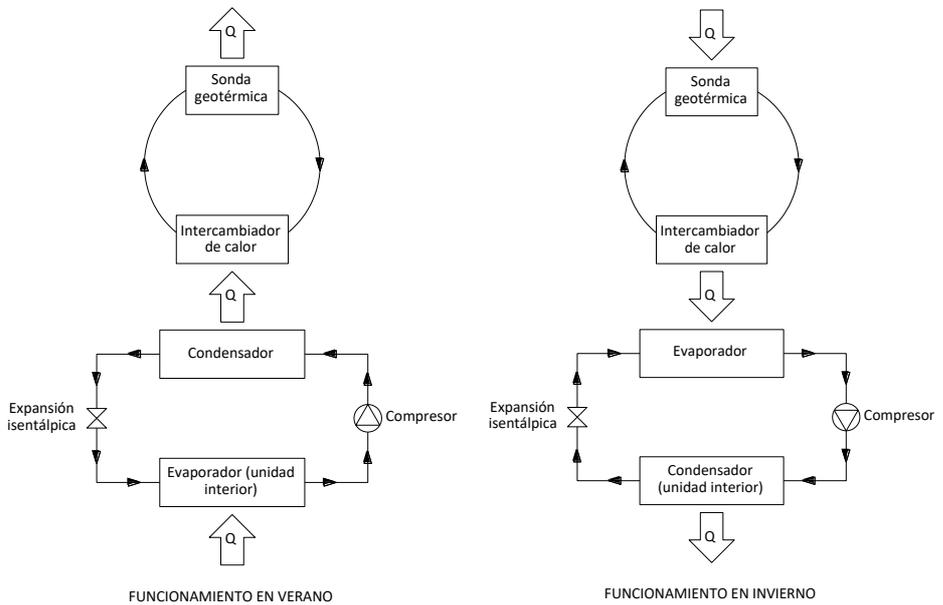


Figura 65 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con unidad interna por aire

En las bombas de calor geotérmicas la unidad interna se puede constituir de diversas maneras. El intercambio entre el condensador o el evaporador de la unidad interna y el ambiente que se quiere climatizar puede ser directo o indirecto. La transferencia directa es como la que se muestra en la Figura 65, mientras que en la Figura 66 esta transferencia se hace de manera indirecta. En este caso, la bomba de calor constituye lo que a menudo se conoce como un *chiller*, esto es un equipo central de bomba de calor que utiliza un sistema de tuberías para llevar el calor a o desde un conjunto de unidades interiores o a un sistema de radiadores o piso radiante. En una de las alternativas consideradas, la bomba de calor funciona como un *chiller*, y el sistema de tuberías transporta el fluido hacia unidades internas de intercambio con el aire en verano y a un sistema de piso radiante en invierno.

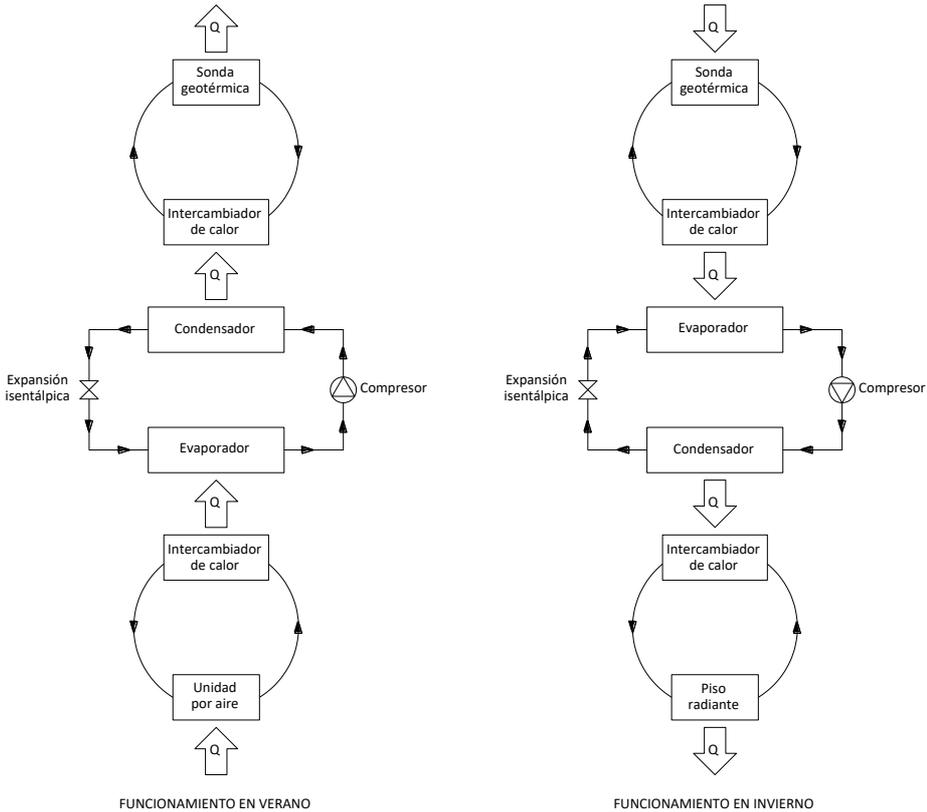


Figura 66 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica funcionando como chiller con unidad por aire en verano y piso radiante en invierno

### **Bombas geotérmicas con sonda vertical**

Las bombas geotérmicas con sondas verticales, llamadas en inglés *borehole heat exchangers (BHE)*, son sistemas de geotermia somera en los que el intercambio de calor con el suelo se logra con un circuito cerrado de tuberías, que se extiende desde la bomba de calor a lo largo del suelo por una perforación vertical. Este circuito de tuberías de desarrollo vertical lineal, llamado usualmente sonda, se encuentra lleno de un fluido que circula a lo largo de él movilizándolo el calor. La transferencia de calor ocurre en el extremo superior en un intercambiador entre la bomba de calor y el fluido de la sonda. A lo largo de toda la extensión de la sonda se transfiere calor con el suelo (Chiasson, 2016).

Las sondas verticales se ejecutan realizando perforaciones con profundidades de entre 50 m y 150 m, con un diámetro del orden de las 5 pulgadas. Una vez ejecutada la perforación, se la rellena con un *grout* (traducido usualmente como lechada) que cumple las funciones de dar estabilidad a la perforación, dar conductividad térmica entre la sonda y el suelo y sellar los acuíferos. Dentro de la perforación se coloca además del *grout* la sonda, que puede tener diversas configuraciones. Entre ellas se cuentan las sondas tipo tubo en U (que se esquematizan en la Figura 67), las sondas tipo doble tubo en U, las sondas tipo tubo concéntrico (constituido por dos tubos de distinto diámetro concéntricos con un sentido de flujo por el centro y el otro entre los dos tubos), y los tubos en espiral. La configuración del tubo modifica la forma en la que se transfiere calor de cada rama que forma parte de la sonda al suelo y también entre ramas de la misma sonda.

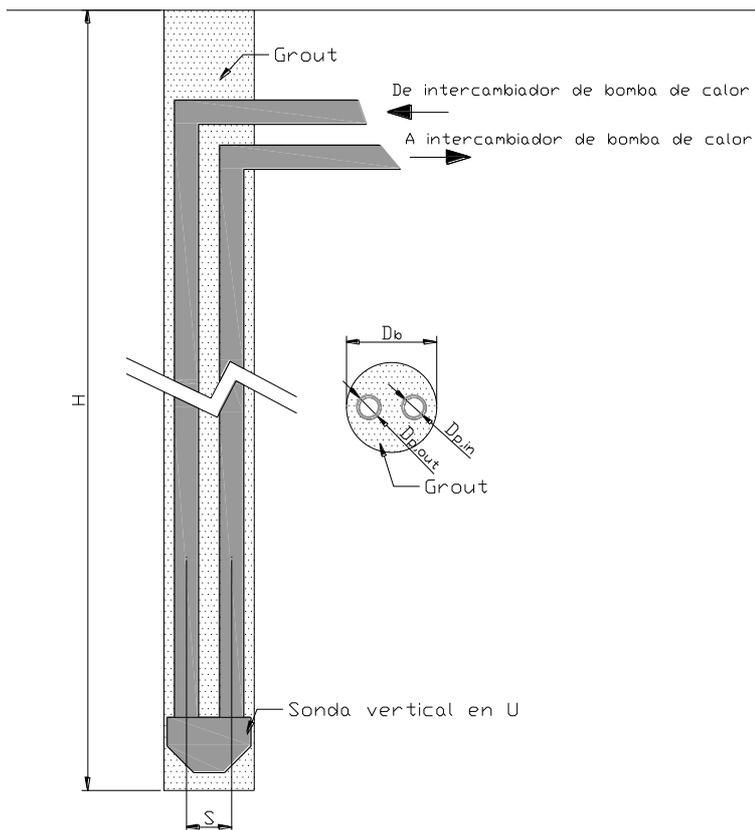
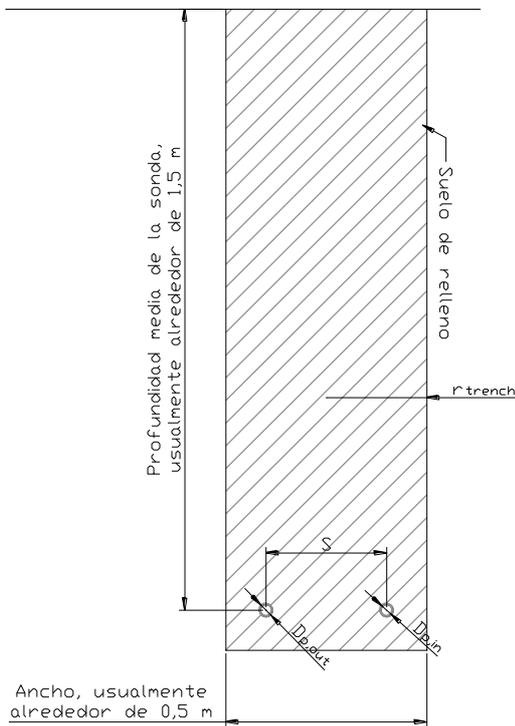


Figura 67 Esquema de dimensiones de una sonda vertical con tubo en U. Elaboración propia (Chiasson, 2016)

## **Bombas geotérmicas con sonda horizontal**

Donde existe gran cantidad de tierra disponible, se suele optar por desarrollar el intercambio con el suelo en la dirección horizontal y a poca profundidad. Se puede excavar una gran superficie y colocar allí conducciones de tuberías cerradas con desarrollo lineal o en área. Por otra parte, si los costos de excavación de trincheras (usualmente con retroexcavadora) son más bajos, se puede optar por excavar en líneas separadas tan angostas como el espacio en el que entren las tuberías (siempre y cuando la excavadora tenga el ancho de pala apropiado). Esta última configuración es la que se considera para este trabajo, si bien con suposiciones adecuadamente tomadas, se puede extrapolar los resultados a la primera configuración.

La trinchera para la colocación de las sondas se coloca con retroexcavadoras que tienen en general anchos de cucharones de entre 30 cm y 75 cm (CAT, 2021). Por esto, el ancho de la trinchera suele ser de alrededor de 0,5 m. La profundidad ronda 1,5 m por cuestiones constructivas, aunque las profundidades óptimas pueden ser otras.



*Figura 68 Esquema de dimensiones de una sonda horizontal. Elaboración propia (Chiasson, 2016)*

## Evaluación del rendimiento de bombas de calor geotérmicas

Una bomba de calor puede mover cantidades de calor superiores a la cantidad de trabajo requerido para tal operación. Por ello, si se define su eficiencia como la relación entre la cantidad de calor movido y la cantidad de trabajo utilizado, se puede obtener valores superiores a 1 (o 100%). En general se considera que la eficiencia de un proceso debe tener un valor máximo de 1, por lo que, se considera que esta relación es una medida de eficacia llamada COP y no una eficiencia. El COP (*Coefficient of Performance*, a menudo traducido como coeficiente de desempeño) se define entonces como  $COP = \frac{Q}{W}$ , donde  $Q$  es el calor movilizado por la bomba de calor y  $W$  es el trabajo utilizado por la bomba. Existen otras medidas de eficacia que se pueden considerar como eficiencias, entre ellas, la eficiencia exergética que, en el caso de las bombas de calor, se define como la relación entre el COP real y el COP del ciclo de Carnot reversible correspondiente.

### Comparación con la eficiencia de calefacción por gas natural

Si se toman distintos criterios a optimizar, tales como las emisiones de efecto invernadero, los precios de producción o los costos variables del consumidor, se puede encontrar un valor límite del COP de una bomba de calor para cada criterio por encima del cual el criterio se logra mejor con la utilización de una bomba de calor y por debajo del cual el criterio se logra mejor calefaccionando con gas natural. Esto se hace tomando la relación de emisiones de efecto invernadero, precio de producción y costos variables de producción entre la electricidad y el gas, afectando al gas por la eficiencia correspondiente de los equipos. Así, el COP límite para cierto criterio es el valor mínimo de COP que tendrá que tener una bomba de calor para satisfacer ese criterio, es decir, para superar al contrincante (en el caso de la Tabla 20, el gas natural) en ese criterio.

Criterio de evaluación	Electricidad domiciliaria	Gas natural domiciliario	Eficiencia de equipos de gas natural	
			52 %	80 %
			COP límite	
Emisiones de efecto gases de efecto invernadero	$0,4237 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh domicilio}}$	$0,442 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh domicilio}}$	0,5	0,77
Combustible consumido en origen	$1,915 \frac{\text{kWh origen}}{\text{kWh domicilio}}$	$1,254 \frac{\text{kWh origen}}{\text{kWh domicilio}}$	0,79	1,22
Costos al consumidor	$14,797 \frac{\$}{\text{kWh domicilio}}$	$1,367 \frac{\$}{\text{kWh domicilio}}$	5,62	8,66
Precios de producción	$76,9 \frac{\text{USD}}{\text{kWh domicilio}}$	$17,2 \frac{\text{USD}}{\text{kWh domicilio}}$	2,32	3,58
Mortalidad por contaminación del aire	$3,42 \frac{\text{muertes}}{\text{TWh domicilio}}$	$1,95 \frac{\text{muertes}}{\text{TWh domicilio}}$	0,91	1,40

*Tabla 20: COP requeridos para cada objetivo para lograr mejor desempeño con una bomba de calor que con calefacción por gas natural.*

Se observa que aun la calefacción con elementos resistivos (cuya eficiencia es del 100%, COP=1) tiene algunos beneficios respecto a calefacción con gas natural. Las bombas de calor, en particular las geotérmicas, suelen superar ampliamente el COP de 1, por lo que tienen el potencial de ser mejores que los equipos a gas según varios de estos criterios o incluso todos. Respecto a esta línea de base se evaluaron las bombas de calor en lo que resta del trabajo.

### **Comparación con la eficiencia de calefacción por gas licuado de petróleo**

La recarga de garrafa de gas licuado de petróleo de 10 kg tiene un precio regulado nacionalmente y se vende en Córdoba por \$515,6 (Programa hogar, 2020). Como el poder calorífico del gas licuado de petróleo es de 46,1 MJ/kg (Bosch, 1996), o lo que es lo mismo, 12,8 kWh/kg, el precio por unidad de energía del gas licuado es de 4,028 \$/kWh (0,041 USD/kWh a cambio de dólar oficial o 0,027 USD/kWh a cambio de dólar MEP). Este precio es 2,95 veces el precio del gas natural. Los COP necesarios para una

bomba de calor que opere con menor costo que la utilización de gas licuado de petróleo se presentan en la Tabla 21. Las emisiones de efecto invernadero y mortalidad asociadas tienen valores semejantes a los del gas natural.

Criterio de evaluación	Electricidad domiciliaria	Gas licuado de petróleo en garrapas de	Eficiencia de equipos de gas natural	
			52 %	80 %
			COP límite	
Costos al consumidor	14,797 $\frac{\$}{\text{kWh domicilio}}$	4,028 $\frac{\$}{\text{kWh domicilio}}$	1,89	2,9

Tabla 21 COP requeridos para cada objetivo para lograr mejor desempeño con una bomba de calor que con calefacción por gas natural.

### **Evaluación del funcionamiento en verano**

Todo lo expuesto previamente es válido sólo para el funcionamiento en invierno (para calefacción). Normalmente no se utilizan para la climatización en verano (refrigeración) equipos que no sean bombas de calor eléctricas. Por eso la única comparación que se puede realizar es entre equipos aerotérmicos y los equipos geotérmicos que se quieren evaluar. Aquí el criterio es simplemente la comparación de los COP. Con esa comparación se puede obtener el ahorro de energía: puesto que el COP se define como la cantidad de calor obtenido dividida la cantidad de trabajo utilizado, el ahorro de energía debido al uso de un COP superior se puede calcular como  $1 - \frac{COP_{menor}}{COP_{mayor}}$ .

### **Modelo utilizado**

Para determinar el desempeño de las bombas de calor, que se resume en el COP, y sus efectos sobre la temperatura del suelo, se desarrollaron dos modelos de bombas de calor geotérmica: uno con sonda vertical y otro con sonda horizontal. A su vez, se desarrolló un modelo para bomba aerotérmica que se utilizó como punto de comparación.

Los modelos fueron en su totalidad desarrollados en un código de elaboración propia escrito en el lenguaje Python. Para cada tipo de bomba de calor se optó por utilizar un modelo unificado, de modo que fuera posible realizar un gran número de corridas de simulación simplemente cambiando algunos parámetros.

En todos los casos, las series de temperatura del aire (al igual que las series de radiación y velocidad del viento utilizadas para el modelo de sonda horizontal) y las funciones de estado del fluido refrigerante se introdujeron al modelo como datos importados, por lo que no se cambiaron en las distintas corridas. En cambio, otros parámetros fueron modificados: el tipo de unidad interna, la longitud de la sonda y la conductividad y el calor específico del suelo. Los coeficientes de pérdidas térmicas del edificio se introdujeron al modelo como datos que podían ser cambiados, pero no se los modificó en las corridas.

Los resultados obtenidos (las series de temperatura del suelo y del COP) fueron retornados para cada corrida como archivos de texto para luego ser procesados utilizando planillas de cálculo.

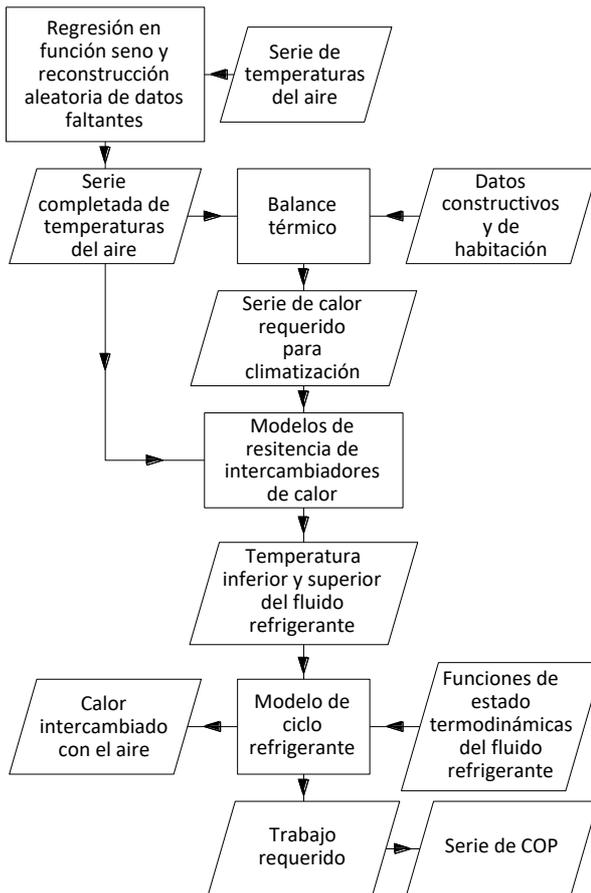


Figura 69 Esquema del modelo para bombas aerotérmicas

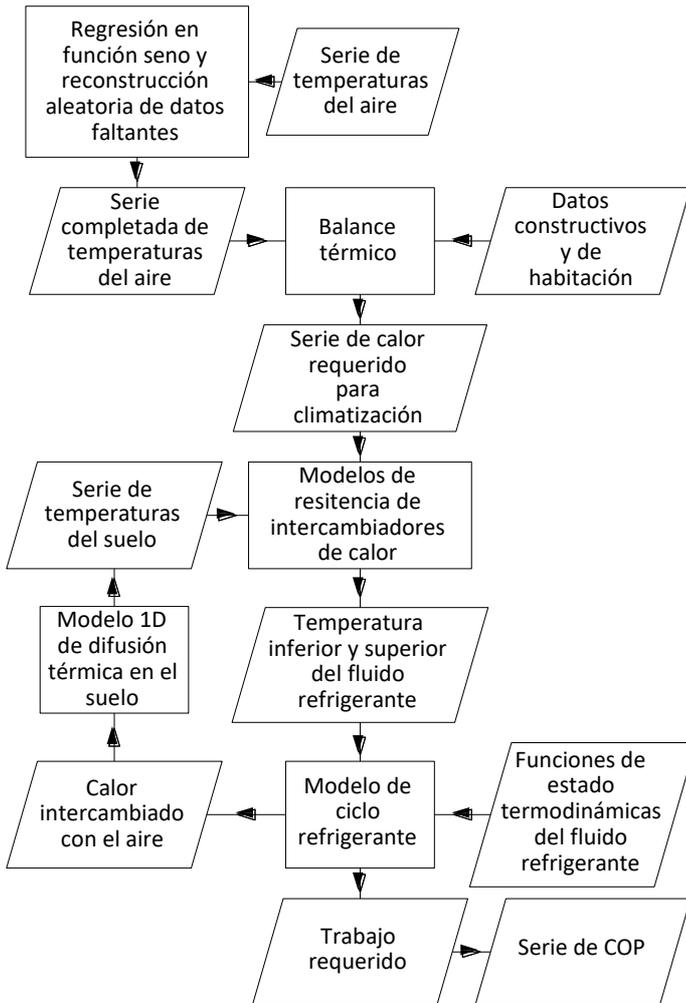


Figura 70 Esquema del modelo para bombas geotérmicas con sonda vertical

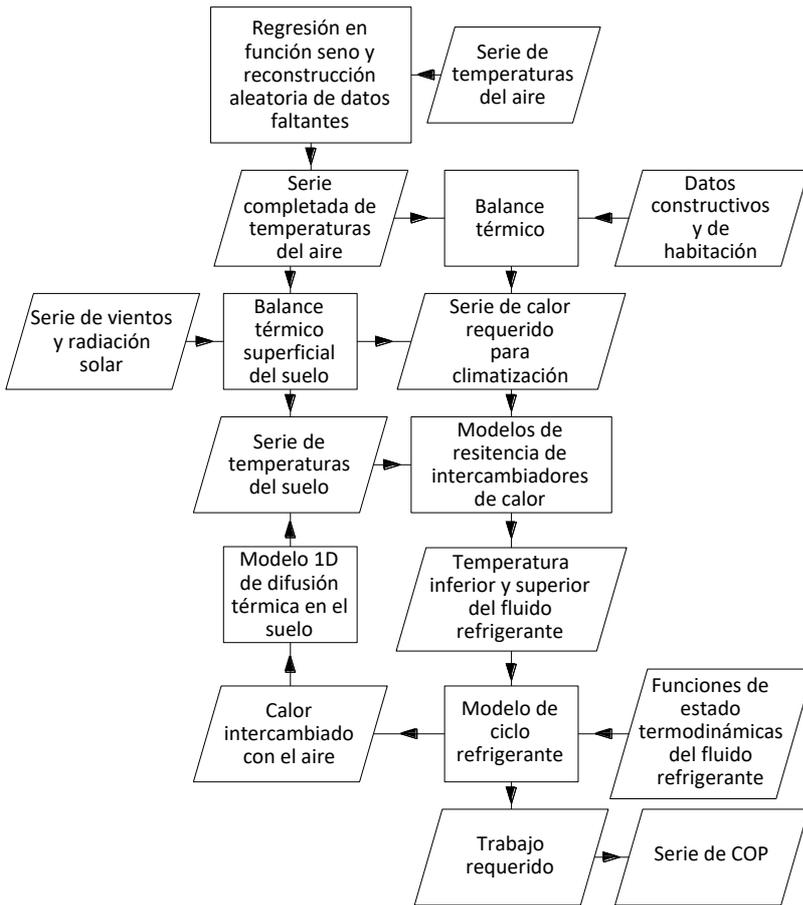


Figura 71 Esquema del modelo para bombas geotérmicas con sonda horizontal

## Discusión

### Comparación de los rendimientos típicos

El reglamento europeo da clases de eficiencia para los distintos valores del SCOP y SEER (Comisión Europea, 2011). Según ellos, la calificación obtenida para los sistemas aerotérmicos sería de F, y en invierno de entre B y A+++ . Para las bombas geotérmicas de sonda vertical, la clase de eficiencia en verano que se obtiene es de entre E y A+, mientras que en invierno es entre B y A+++ . Para las bombas de calor geotérmicas con

sonda horizontal, la clase de eficiencia en verano se encuentra entre F y B, y en invierno, entre A y A+++.

Estas clasificaciones encontradas no son significativas desde un punto de vista absoluto, puesto que el sistema propuesto puede tener características que lo hacen más ineficientes de lo normal en ciertas condiciones y otras que lo hacen más eficientes de lo normal. Por ejemplo, las caídas de presión relativamente altas que se consideran en el conducto de succión y de descarga tienen mucha más influencia sobre la eficiencia con temperaturas altas que con temperaturas bajas, lo que explica que las eficiencias de verano obtenidas sean relativamente bajas y que las eficiencias de invierno sean relativamente altas. Por otra parte, el no considerar otros consumos de la bomba quita influencia sobre la eficiencia a los menores consumos.

En general, el hecho de que las variaciones obtenidas comprendan todo el espectro de las clasificaciones indica que los cambios que genera elegir correctamente la configuración de un sistema son significativos.

### **Longitudes óptimas**

En los resultados de la modelación de los sistemas con sondas verticales, se observa (ver Figura 72 y Figura 73) que la longitud óptima de sonda seguramente se encuentre entre 3 y 5 m por m<sup>2</sup> a climatizar (tanto para sistemas con unidad interna por aire o tipo chiller y piso radiante), puesto que el incremento del rendimiento en este rango es mucho mayor que el incremento en el rango que le sigue (de 5 a 7 m). Por lo que se concluye que, a pesar de que las conductividades del suelo de Córdoba son relativamente bajas, las recomendaciones realizadas por la norma alemana VDI serían válidas aquí. Sin embargo, el óptimo real dependerá de la relación entre el costo marginal de aumentar la longitud de la sonda y el beneficio marginal de la disminución del consumo de energía.

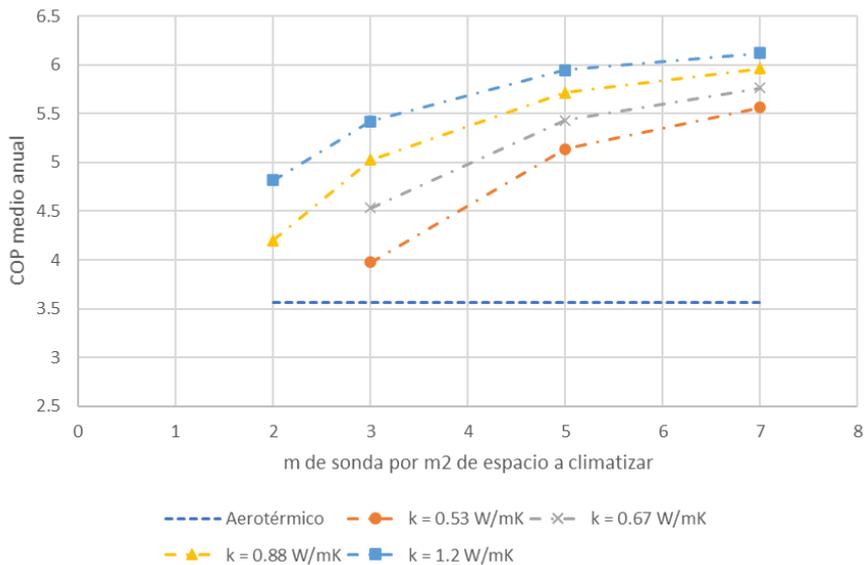


Figura 72 Gráfico resumen del COP medio anual de bombas de calor con sonda vertical y unidad interna por aire

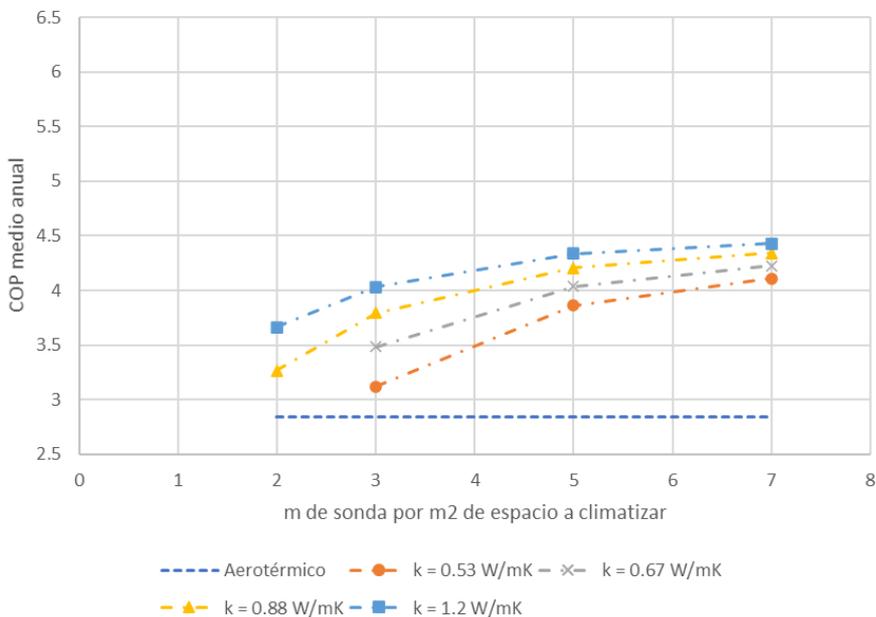


Figura 73 Gráfico resumen del COP medio anual de bombas de calor con sonda vertical y unidad interna por chiller y piso radiante

Observando en la Figura 74 y la

Figura 75 los incrementos del rendimiento que ofrece alargar la sonda horizontal, se puede concluir que el punto de longitud óptima se encuentra entre los 2 m y los 3 m para las mejores conductividades del suelo y entre los 3 y 5 m para las menores conductividades. Más allá de eso, se observa que el incremento de la longitud genera incrementos del rendimiento relativamente menores.

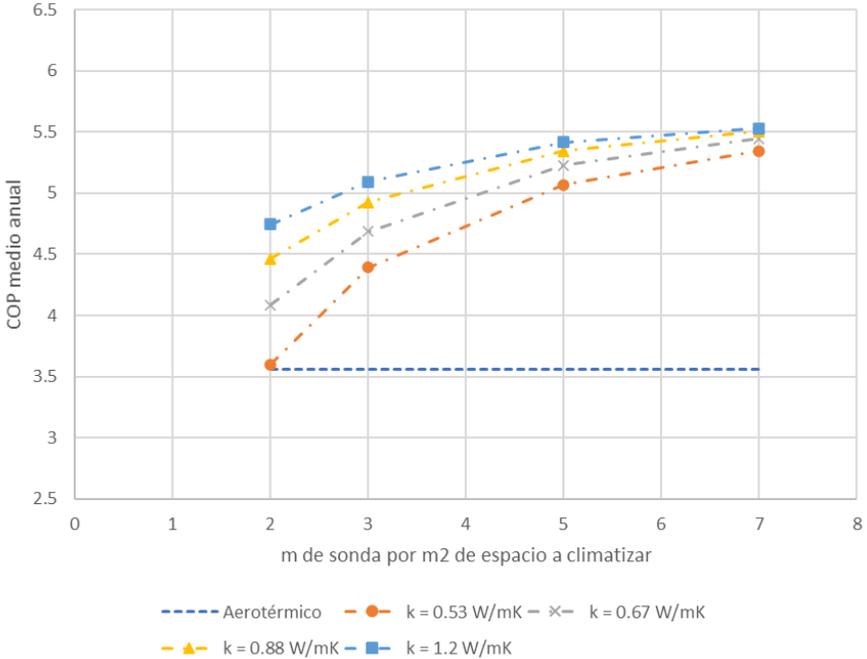


Figura 74 Gráfico resumen del COP medio anual de bombas de calor con sondas horizontales y unidad interna por aire

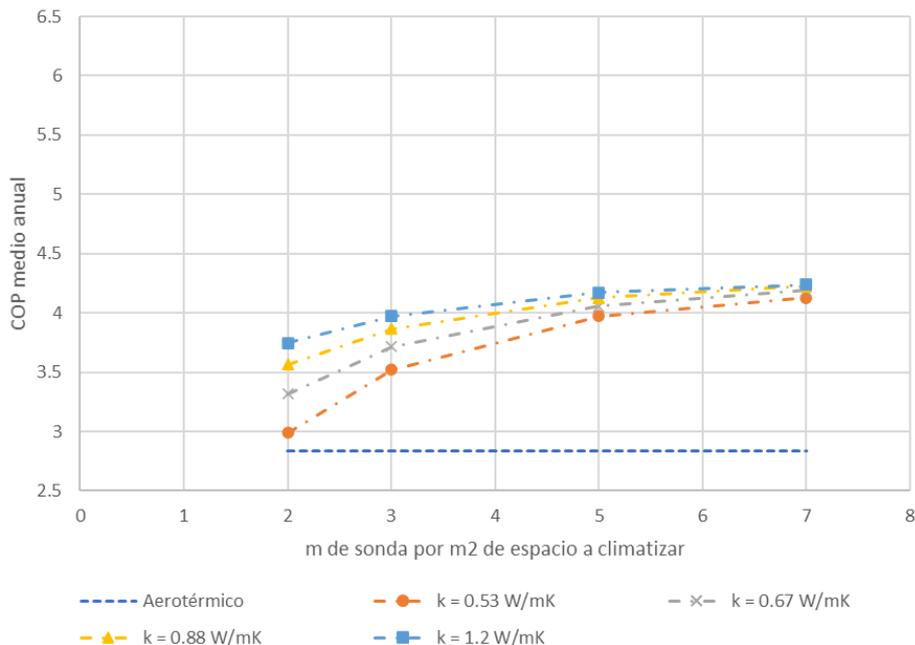


Figura 75 Gráfico resumen del COP medio anual de bombas de calor con sondas horizontales y unidad interna por chiller y piso radiante

### **Sensibilidad a la conductividad térmica del suelo**

Los suelos de la ciudad de Córdoba se encuentran en el límite inferior de las conductividades a las que la utilización de las bombas de calor geotérmicas ofrece un beneficio sustancial en rendimiento. El rango inferior de conductividades tomadas para este trabajo (que no es el mínimo absoluto de conductividad observada en Córdoba) solamente tiene eficiencias de las bombas geotérmicas sustancialmente superiores a las de los sistemas aerotérmicos cuando las longitudes de sonda son excesivas. Por eso, según los resultados de estas modelaciones, en muchos suelos de la ciudad no sería viable aplicar este tipo de sistemas, indistinto del costo que tengan.

Por otra parte, en el rango de variación de la conductividad del suelo considerado (entre  $0,53 \frac{W}{m \cdot K}$  y  $0,88 \frac{W}{m \cdot K}$ ) los rendimientos de la bomba de calor geotérmica varían en un 10% cuando se consideran las longitudes establecidas previamente como óptimas. Para las características del suelo del este y el sur de la provincia, donde se estimaron conductividades del suelo mínimas del orden de  $1,2 \frac{W}{m \cdot K}$ , se obtuvieron rendimientos en general entre un 5 y un 10% mejores que los rendimientos

para  $0,88 \frac{W}{m K}$ . Esta es una mejora que es significativa pero no decisiva. La mayor ventaja la ofrecen en los límites de funcionamiento de las bombas de calor (las menores longitudes permitidas), donde las mejoras son del orden del 10 al 15%. Poder disminuir las longitudes de sonda es muchas veces más importante que lograr un COP marginalmente mejor. Estas zonas de la provincia presentarían el mayor potencial geotérmico somero en suelos no saturados. La menor profundidad del nivel freático en estas partes de la provincia permitiría además aprovechar el transporte convectivo de calor, aumentando el rendimiento a menores longitudes de sondas. El análisis de este tipo de intercambio de calor, sin embargo, excede el alcance del presente trabajo.

### **Efectos del clima del sitio**

Los resultados de las modelaciones muestran un beneficio sustancial que tiene la ciudad de Córdoba para la aplicación de bombas de calor geotérmicas: su temperatura media anual cercana a la temperatura de confort de habitación. Por un lado, esto le permite al suelo funcionar en la práctica como un gran almacén de calor, puesto que la cantidad de calor requerida para la calefacción es cercana a la cantidad de energía requerida para la refrigeración: durante el verano el suelo absorbe energía térmica de la bomba y se la devuelve en el invierno. Por otro lado, la temperatura media del suelo también permite buenas eficiencias en verano y en invierno.

La zona de la pampa cordobesa, donde las características geotécnicas son favorables a la implementación de sistemas con bombas de calor geotérmicas tiene temperaturas superficiales del suelo medias de entre 16 y 19°C. Esto hace que estas áreas gocen de beneficios semejantes a los de la Ciudad de Córdoba, por su clima.

### **Separación entre sondas**

Las separaciones entre sondas que se observan como posibles según los resultados obtenidos son significativamente menores a las recomendadas por las normas y la bibliografía. Esto se debe fundamentalmente a las menores conductividades del suelo que obligan a utilizar mayores longitudes de sonda, con menor densidad de energía. Así, si bien tener menor conductividad es desventajoso por dificultar la transferencia de calor al suelo, puede ser ventajoso porque permite acercar las sondas entre sí. Se nota que una separación entre sondas verticales de 4 m es buena para la mayoría de los casos tomados. A su vez, separaciones entre sondas horizontales de 2 m parecen ideales. Para las sondas horizontales, con menores densidades de calor transferido (mayores longitudes de sonda) separaciones menores son posibles, sin embargo, estas

longitudes no son recomendables porque ofrecen beneficios reducidos en aumento del COP.

Las sondas horizontales de 2 m de largo por  $\text{m}^2$  a climatizar ocupan un área de 11,1  $\text{m}^2$ , las áreas necesarias son significativamente mayores a las expuestas por la norma alemana VDI. Por ello, con la forma constructiva analizada, no se cumpliría con las recomendaciones de dicha norma. Por otra parte, ocupar 10 veces la superficie climatizada con sondas horizontales no sería viable en la mayoría de los casos. Por ello, se cree más conveniente utilizar la mínima longitud que permita el funcionamiento de la bomba de calor fuera de la región supercrítica (según lo modelado alrededor de 1,6 m por  $\text{m}^2$  a climatizar) y generar superposición de los radios de influencia térmica de las sondas.

Sin embargo, el modelo muestra que el radio de influencia de las sondas es menor al calculado. Esto se debe seguramente a la interacción con la superficie. Si se consideran como válidos estos resultados, las superficies de sonda recomendadas por  $\text{m}^2$  de superficie a climatizar serían de entre 4 y 10  $\text{m}^2$ . Estas áreas son más razonables y concuerdan en su rango inferior con los valores recomendados por la norma alemana VDI. Sin embargo, una determinación más certera de los resultados de este análisis requeriría modificar el modelo utilizado agregando múltiples sondas. Esta reducción de la superficie es muy importante para sitios donde la superficie no existe en exceso, como en los entornos urbanos. Por eso este tipo de análisis sería altamente recomendable pudiendo reducirse significativamente la superficie ocupada, que a menudo puede ser un recurso escaso determinante del diseño del sistema. Al igual que con la sonda vertical, el óptimo real de longitud y superficie dependerá de la relación entre el costo marginal de aumentar la longitud de la sonda y el beneficio marginal de la disminución del consumo de energía.

## Conclusiones

El trabajo de desarrollo del modelo y el análisis de los resultados han mostrado que las bombas de calor geotérmicas pueden ser modeladas efectivamente en una serie temporal. Utilizando series temporales de las temperaturas del aire y otras variables menores, se pudo simular la variación de los COP y de las temperaturas del suelo a lo largo del tiempo.

La utilización de bombas de calor, sin importar que se trate de su versión geotérmica o aerotérmica ofrece beneficios económicos, ambientales y sociales, por su eficiencia y por la accesibilidad universal a la energía eléctrica. Los COP obtenidos por los sistemas modelados son, en su gran mayoría, superiores a los que se requerirían para ofrecer este tipo de beneficios. Sin embargo, la relación de precios para el usuario entre el gas natural y la electricidad dificulta su implementación a gran escala. Según

lo observado, esto sería válido tanto para la ciudad de Córdoba, como para el resto de la provincia y del país.

Con valores de COP en la operación en invierno de bombas de calor geotérmicas que se encuentran en su mayoría entre 3,5 y 6, se logra reducir las emisiones de efecto invernadero respecto a sistemas de gas natural en un factor de 4,5 a 12, reducir el consumo de combustible en un factor de 2,9 a 7,6, reducir los costos de producción de la energía en un factor de 1 (sin reducción) a 2,6 y reducir la mortalidad por contaminación del aire asociada a la calefacción de hogares en un factor de 2,5 a 6,6. Este último valor es equivalente a una reducción de 1,2 a 1,7 muertes por TWh de combustible utilizado para calefacción domiciliaria.

En comparación con la calefacción por gas licuado de petróleo, se generaría una caída del costo de la energía para los usuarios con un factor de entre 1,2 y 3,2. Mientras que, en comparación con la calefacción resistiva, se reducen los consumos de energía en un factor de entre 3,5 y 6.

Las bombas de calor geotérmicas han mostrado poder desarrollar valores de COP significativamente superiores a los de las bombas aerotérmicas en todos los casos. Esto garantiza que, desde el punto de vista energético, son favorables en comparación. Los aumentos del rendimiento varían sin embargo entre el 7% y el 72% (COP de entre 3,04 y 6,12), dependiendo de la longitud de las sondas y la conductividad del suelo. La conveniencia de la utilización de uno u otro dependerá de los costos de construcción, pero el orden de magnitud de ahorros de energía da una idea de los costos máximos que podrán tener los equipos para ser económicamente rentables.

Como un tipo de energía ubicua, renovable y limpia, la energía geotérmica de baja entalpía ofrece grandes posibilidades para la Provincia de Córdoba y el país en general. Sin embargo, es necesario aplicarlo correctamente para poder aprovechar al máximo sus beneficios, mitigando sus costos.

### **Dependencia de las características del suelo, las condiciones climáticas y constructivas**

De todo lo modelado y desarrollado teóricamente se resalta que la característica del sistema determinante del COP obtenido no es siempre la misma. La eficiencia del sistema de transporte de calor depende en fin de un conjunto de resistencias (la resistencia del suelo, la resistencia de la sonda, las de los intercambiadores de calor agua-agua y la de los intercambiadores de calor agua-aire), en algunas situaciones todas estas pueden colaborar en una magnitud semejante a disminuir el valor del COP.

Sin embargo, si se busca mejorar uno solo de esos parámetros, luego de cierto nivel de mejora, los efectos sobre el sistema serán mínimos. Un conjunto de resistencias puestas en serie tendrá una resistencia mínimamente tan grande como la mayor de la resistencia que las compone.

La conductividad térmica es una de las principales variables que incide sobre el desempeño de los sistemas geotérmicos. El aumento de la conductividad del suelo en los rangos comunes de Córdoba es del orden del 10%. Un aumento del 10% del COP es significativo, pero más significativo es la disminución de las mínimas longitudes de sonda, que disminuye sustancialmente los costos de instalación. En el este y sur de Córdoba los rendimientos de sistemas geotérmicos someros pueden ser mejores en más de un 10%. La conductividad es un valor que tiene una importancia fundamental en el desempeño de los sistemas geotérmicos, pero los beneficios de una mejor conductividad del suelo sólo pueden ser aprovechados si la conductividad es el factor limitante, es decir, si las demás variables no son las que generan las mayores resistencias al ciclo.

Por otra parte, las conductividades relativamente bajas de los suelos de Córdoba traen una ventaja. Las áreas de influencia térmica de las bombas de calor se reducen en tamaño, con lo que el impacto sobre la temperatura del suelo se ve reducido.

Las condiciones climáticas de la ciudad de Córdoba son buenas para el desarrollo de bombas de calor geotérmicas, porque los requisitos de calefacción y refrigeración se encuentran relativamente balanceados durante el año. Así, el suelo recibe energía en verano que devuelve en invierno, siendo un ciclo prácticamente estacionario. El resto de la provincia tiene temperaturas no muy distantes, por lo que se encuentra también cercana a este equilibrio.

Las características constructivas del edificio son una variable fundamental de la economía y sustentabilidad de los sistemas de calefacción. Si bien no fue el enfoque de este trabajo, la eficiencia energética de los edificios es fundamental para optimizar los sistemas de climatización.

## **Conclusiones del modelo**

Como se observó en los resultados, los valores instantáneos del COP son altamente variables. Por eso es muy difícil determinar el valor del COP medio (y con él, los consumos energéticos) con métodos simplificados. Las simulaciones numéricas de este tipo ofrecen entonces un gran beneficio en cuanto a que modelan las grandes variaciones de los parámetros de entrada del sistema y tienen en cuenta la interrelación sistema-suelo.

La utilización de un intervalo de tiempo horario parece ser uno de los grandes beneficios del modelo utilizado. La disponibilidad de bases de datos de estaciones meteorológicas automáticas con toma de datos subhoraria permite un modelado preciso de las condiciones de operación.

### **Recomendaciones generales**

Como primera recomendación para quien deba realizar una instalación geotérmica de baja entalpía en suelos no saturados, se propone tener en cuenta a priori tantas variables como sea posible. Teniendo en cuenta ciertas magnitudes se puede evaluar si una u otra variable va a ser determinante del desempeño del sistema. Por ejemplo, si se observa que la bomba de calor usualmente funciona con grandes diferencias de temperatura entre el condensador y el evaporador, más allá de la temperatura interna y externa, el problema no estará en las características del suelo, sino seguramente en las características de la bomba.

A nivel legislativo, se recomienda tener en cuenta a la energía geotérmica en la formulación de las leyes de fomento de la sustentabilidad y de la eficiencia energética. El hecho de que las normas existentes hayan sido escritas sin tener en cuenta la existencia de los aprovechamientos geotérmicos de baja entalpía puede poner diversas trabas en el desarrollo de una tecnología que potencialmente puede generar grandes beneficios ambientales y económicos. La formulación de las leyes con una visión amplia, teniendo en cuenta que diversas soluciones pueden surgir a los problemas presentes y futuros favorece la innovación en el proceso de solución de problemas.

Como recomendación a nivel de la gestión, para favorecer el desarrollo de los sistemas geotérmicos de baja entalpía y la electrificación en general de los consumos energéticos de las personas, es necesario generar una paridad entre la relación de costos de las distintas formas de energías para el usuario y la relación de costos para la sociedad en general. Si los usuarios pagan 10 veces por la energía eléctrica respecto a lo que pagan por los combustibles sólidos, pero la relación de costos para la sociedad en general es de 3 para los costos directos y de 1 para las externalidades, la transición hacia formas de utilización de la energía más sustentables y justas se ve fuertemente dificultadas. La utilización de un “milagro tecnológico” como son los rendimientos muy superiores al 100% de las bombas de calor se ve impedido por los incentivos y restricciones puestos por la gestión con criterios desactualizados.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Agemar, T., Weber, J., & Schulz, R. (2014). Deep Geothermal Energy Production in Germany. *Energies*, 7(7), 4397-4416. doi:10.3390/en7074397
- Allen, A., Milenic, D., & Sikora, P. (2003). Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics*, 32(4-6), 569-578. doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03755650503000634>
- Bosch. (1996). *Manual de la técnica del automóvil* (Tercera ed.). Barcelona: Reverte, S.A.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières. (2005). *Les Enjeux des Géosciences*. Orléans: Direction de la Communication et des Éditions.
- CAT. (2021). *Cucharones: parte posterior de la retroexcavadora*. Obtenido de CAT: [www.cat.com/es\\_MX/products/new/attachments/buckets-backhoe-rear.html](http://www.cat.com/es_MX/products/new/attachments/buckets-backhoe-rear.html)
- Chiasson, A. D. (2016). *Geothermal Heatpump and Heat Engine Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Comisión Europea. (4 de mayo de 2011). Reglamento delegado (UE) N° 626/2011. Bruselas.
- Department of Energy, US. (2021). *Electricity Generation*. Obtenido de Energy.gov: [www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation](http://www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation)
- DiPippo, R. (2004). Second Law Assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, 33(5), 565-586. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.10.003>
- Fridleifsson, I., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J., Ragnarsson, Á., & Rybach, L. (2008). The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Proceedings*, 59-80.
- Gekk 2k. (2020). уложенный спиральный коллектора высотой 2 метра. Obtenido de [commons.wikimedia.org/wiki/File:Spiral\\_collector\\_in\\_trench.jpg?uselang=ru&\\_x\\_tr\\_sl=auto&\\_x\\_tr\\_tl=en&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=ajax](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spiral_collector_in_trench.jpg?uselang=ru&_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=ajax)

- Gómez, J. R. (2019). Los servicios geológicos mineros y geotérmicos de Argentina, acciones para valorizarlos. *Seminario oro y plata* (pág. 14). Secretaría de Política Minera. Obtenido de [enernews.com/public/archivos/JNmTa58jYsy0edJuHQQtQ4A9aUfKxUfYLpfU4tuE.pdf](https://enernews.com/public/archivos/JNmTa58jYsy0edJuHQQtQ4A9aUfKxUfYLpfU4tuE.pdf)
- Heberle, F., Preißinger, M., & Brüggemann, D. (2012). Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources. *Renewable Energy*, 37(1), 364-370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.044>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2012). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, Censo del Bicentenario, Resultados definitivos, Serie B N° 2*. Buenos Aires: INDEC.
- Johnson, M. (2006). A horizontal closed loop field for a heat pump heat exchanger. A 3-ton slinky loop prior to being covered with soil. The three slinky loops are running out horizontally with three straight lines returning the end of the slinky coil to the heat pump. Obtenido de [commons.wikimedia.org/wiki/File:3-ton\\_Slinky\\_Loop.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3-ton_Slinky_Loop.jpg)
- NASA. (2021). *Albedo (1month)*. Obtenido de NASA Earth Observations (NEO): [neo.sci.gsfc.nasa.gov](https://neo.sci.gsfc.nasa.gov)
- Niemitalo, O. (2015). Drilling of a borehole for residential geothermal heating in Northern Finland. Obtenido de [commons.wikimedia.org/wiki/File:Geothermal\\_drilling\\_for\\_residential\\_heating.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geothermal_drilling_for_residential_heating.jpg)
- Østergaard, P. A., & Lund, H. (2011). A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, 88(2), 479-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.018>
- Programa hogar. (2 de Julio de 2020). *Precios máximos de referencia*. Obtenido de Argentina.gob.ar: [www.argentina.gob.ar/economia/energia/programa-hogar/precios-maximos-de-referencia](http://www.argentina.gob.ar/economia/energia/programa-hogar/precios-maximos-de-referencia)