



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ARTE

CARRERA DE ARQUITECTURA

**“Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema
de climatización pasiva para el acondicionamiento de
viviendas”**

GRADO PRETENDIDO: ARQUITECTO

AUTOR: JUAN ANDRÉS PESSOLANI VALDÉS

SAN LORENZO - PARAGUAY
Diciembre 2020



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
CARRERA DE ARQUITECTURA**

**APROBACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN,
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ARQUITECTO**

TEMA:

“Climatización Pasiva”

TITULO:

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

NOMBRE DEL POSTULANTE: Juan Andrés Pessolani Valdés

CALIFICACIÓN

FECHA

..... /...../.....

TRIBUNAL EXAMINADOR

1.
2.
3.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ARTE**

Trabajo final de graduación para la obtención del título de
arquitecto

**PROPUESTA DE DISEÑO DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS COMO SISTEMA
DE CLIMATIZACIÓN PASIVA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE
VIVIENDAS**

AUTOR

Juan Andrés Pessolani Valdés

TUTOR

Arq. Sofía Gill

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

**San Lorenzo
Diciembre - 2020**

A la Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte de la U.N.A., profesores y tutores por su orientación y aporte a mi formación profesional. En especial, a los profesores Arq. Silvio Ríos, Arq. Sofía Gill, Arq. Ana Flores y la Ing. Delia Cohenca.

A Stephe, mi mamá por su paciencia y amigos por el apoyo constante. A todas las personas que con su paciencia o conocimiento colaboraron en la realización de este Trabajo Final de Grado.

Muchas gracias.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Para todos los arquitectos y constructores comprometidos con el medioambiente

ABSTRACT

Se realiza la investigación con el objetivo general de elaborar una propuesta de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos para el acondicionamiento de viviendas a fin de indagar su factibilidad de implementación. Al alcanzar todos los objetivos específicos propuestos se concluye que existen numerosas ventajas con respecto al sistema de acondicionamiento tipo split si se aplican parámetros de diseño apropiados y, aunque el costo inicial es mayor, hay un gran potencial de ahorro a largo plazo.

Los casos estudiados demuestran que la disminución de temperatura a la salida del sistema es considerable durante periodos de calor. Los mayores obstáculos para la aceptación del sistema intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) están relacionados a la calidad del aire, costo inicial, área requerida para su construcción y desconocimiento sobre sus beneficios.

Debe resaltarse que sus ventajas son: la apropiación tecnológica, simplicidad, descentralización de la tecnología, ahorro en costos de operación y bajo impacto medioambiental. Las pautas de optimización del diseño definen un sistema ICTA apropiado y eficiente que maximice el desempeño y la factibilidad constructiva; alcanzando un costo inicial de cincuenta millones de guaraníes con un ahorro energético anual máximo de diez millones de guaraníes mensuales, comparado a un sistema tipo split.

Para concluir, se han logrado identificar casos locales de aplicación de climatización pasiva, lo que ha permitido determinar las ventajas y desventajas del sistema, estableciendo pautas que optimicen su diseño y construcción, incluyendo un análisis de costos de un sistema ICTA que asegure el cuidado del medioambiente considerando el confort térmico de los usuarios.

Esta investigación abre camino hacia un futuro posible de tecnologías apropiadas para la climatización pasiva, presentando casos de aplicación local, demostrando las ventajas y estableciendo las mejores prácticas para aprovechar la energía latente del suelo, promoviendo el confort humano sin degradar el medioambiente.

ÍNDICE

ABSTRACT	VI
LISTA DE CUADROS	X
LISTA DE ILUSTRACIONES	XII
INTRODUCCIÓN	14
Antecedentes	15
Justificación.....	15
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
Metodología.....	16
Aplicabilidad	17
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. Tecnologías Alternativas	18
1.1.1. Construcción Sostenible mediante Tecnologías Alternativas	21
1.2. Acondicionamiento térmico de los edificios	23
1.2.1. Sistema de acondicionamiento activo.....	23
1.2.2. Sistema de acondicionamiento combinado.....	24
1.2.3. Sistema de acondicionamiento pasivo.....	24
1.2.3.1. Acondicionamiento térmico natural como fundamento del sistema pasivo.....	25
1.2.3.2. Estrategias de acondicionamiento térmico pasivo	25
- El suelo como disipador de calor	29
- Tipo de suelo	31
- Estrategias de Control de Temperatura del Suelo.....	31
- Ductos Subterráneos como tecnología alternativa para climatización pasiva	32
- Funcionamiento de los ductos subterráneos	34
- Tipos de ductos subterráneos	35
Según la disposición de los ductos.....	35
Según su orientación	37
Según circuito del aire	37
Componentes de los ductos subterráneos	38
Materialidad.....	39
Características Geométricas del Ducto	40
Cantidad de ductos.....	43
Nivel de profundidad del ducto	44
Flujo de aire dentro del ducto y ventilación de los ambientes	45
Pendiente de inclinación y ángulos de los ductos.....	45
Humedad del suelo y la conductividad térmica de los ductos.....	46
Control de operación del sistema ICTA.....	47
1.2.3.3. Diseño y cálculo del sistema ICTA	47

1.2.3.4. Estrategias complementarias para mejorar el rendimiento del sistema ICTA.....	49
➤ Chimeneas Solares	49
➤ Sistemas convencionales de aire acondicionado tipo split	50
➤ Sistemas de Aislación Térmica.....	50
➤ Aprovechamiento de la Inercia Térmica	51
➤ Enfriamiento del suelo	51
1.2.3.5. Productos Comerciales.....	51
CAPÍTULO II: CASOS DE APLICACIÓN DE CLIMATIZACIÓN PASIVA POR MEDIO DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS EN PARAGUAY	54
2.1. Contexto local.....	54
2.1.1. Factores Climáticos en Paraguay	54
2.1.2. Los profesionales independientes, sector privado y organizaciones	55
2.1.2.1 El Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible	55
2.1.3. El INTN y las Normas Paraguayas de Construcción Sostenible	57
2.2. Aplicación de Ductos Subterráneos en Paraguay	58
2.2.1. Caso 1: Prototipo Vivienda Sostenible, Asunción	59
2.2.2. Caso 2: Sala Politécnica, San Lorenzo.....	65
2.2.3. Caso 3: Vivienda Takuru, Piribebuy.....	71
2.2.4. Comparaciones entre los casos estudiados	77
CAPÍTULO III: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS EN EL CAPÍTULO ANTERIOR	81
3.1. Ventajas del sistema ICTA con respecto al sistema tradicional de aire acondicionado tipo Split.....	81
3.1.1. Simplicidad y mano de obra no especializada	81
3.1.2. Control local y participativo.....	81
3.1.3. Pequeña escala y descentralizado	82
3.1.4. Ecológicamente apropiado y energéticamente eficiente.....	82
3.1.5. Economía durante el ciclo de vida	82
3.1.6 Incentivos económicos, impositivos y reconocimientos	83
3.1.7 Libre de ruido.....	83
3.1.8 Mejor calidad de aire y mayor confort térmico	83
3.2. Desventajas del sistema ICTA con respecto al sistema tradicional de aire acondicionado tipo Split.....	83
3.2.1. Costo Inicial	83
3.2.2. Requerimientos de espacio	84
3.2.3. Acumulación de agua	84
CAPÍTULO IV: PAUTAS DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS PARA EL ACONDICIONAMIENTO PASIVO DE VIVIENDAS.....	87
4.1. Planificación del ICTA	87

4.2. Construcción del sistema	89
4.2.1. Materiales y herramientas.....	89
4.2.2. Excavación de las zanjas.....	91
4.2.3. Colocación de ductos.....	93
4.2.4. Entrada de aire	94
4.2.5. Salida de aire	96
4.2.6. Relleno de las zanjas.....	96
4.2.7. Construcción existente.....	97
4.3. Operación y funcionamiento.....	98
4.3.1. Combinación con otros sistemas	98
4.3.2. Mantenimiento	98
4.4. Estrategias de mitigación de problemas comunes al sistema	99
CAPÍTULO V: COSTOS DE MATERIALES Y MANO DE OBRA ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN PASIVA POR MEDIO DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS.	102
5.1 Cálculos para la validación de la propuesta	107
5.2 Análisis económico de la construcción del sistema ICTA.....	112
5.2.1 Costo del sistema de aire acondicionado convencional tipo split	112
5.2.2 Costo del sistema ICTA	114
5.2.2.1 Costo de excavación y relleno	114
5.2.2.2 Costo de instalación de los ductos.....	115
5.2.2.3 Costo de operación y mantenimiento.....	115
CONCLUSIÓN.....	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Diferencias entre tecnología alternativa y tecnología convencional	20
Cuadro 2: Principios básicos de las construcciones pasivas	20
Cuadro 3: Las tecnologías alternativas y los ODS	22
Cuadro 4: Elementos del sistema pasivo	28
Cuadro 5: Efectos de las propiedades térmicas del suelo en el rendimiento de un sistema ICTA	31
Cuadro 6: Técnicas de control de temperatura del suelo	32
Cuadro 7: Trazado de los ductos subterráneos	36
Cuadro 8: Clasificación según la orientación	37
Cuadro 9: Clasificación según el circuito de aire	37
Cuadro 10: Potencial de enfriamiento y calefacción de sistemas ICTA, según material	39
Cuadro 11: Materiales no recomendados	40
Cuadro 12: Tipos de ducto según sección longitudinal	41
Cuadro 13: Ángulos y resistencia al flujo de aire	46
Cuadro 14: Herramientas de cálculo del sistema ICTA	48
Cuadro 15: Normas paraguayas de Construcción Sostenible	57
Cuadro 16: Velocidades del impulsor axial	67
Cuadro 17: Características generales de los casos estudiados	77
Cuadro 18: Características particulares de las aplicaciones locales	77
Cuadro 19: Comparativo de los casos estudiados	78
Cuadro 20: Análisis de pautas de diseño por caso de estudio	79
Cuadro 21: Matriz de costos relativos	83
Cuadro 22: Ventajas y desventajas del sistema ICTA con respecto a un sistema de aire acondicionado convencional	85

Cuadro 23: Materiales necesarios	90
Cuadro 24: Herramientas necesarias	91
Cuadro 25: Consideraciones previas a la excavación	93
Cuadro 26: Herramientas mantenimiento para un sistema ICTA.....	99
Cuadro 27: Técnicas de mantenimiento de un sistema ICTA	99
Cuadro 28: Problemas comunes y estrategias de mitigación	100
Cuadro 29: Pautas de diseño para un intercambiador de calor tierra-aire.	102
Cuadro 30: Datos para el cálculo.....	107
Cuadro 31: Ductos y ambientes.....	108
Cuadro 32: Cálculo de los ductos C1 y C2	108
Cuadro 33: Cálculo del ducto C3	109
Cuadro 34: Cálculo de los ductos C4 y C5	110
Cuadro 35: Comparación de las temperaturas de salida calculadas	111
Cuadro 36: Costos de instalación de un sistema tipo split.....	113
Cuadro 37: Costos operación de un sistema tipo Split (Gs.) por equipo....	113
Cuadro 38: Costo total de operación de un sistema tipo split	113
Cuadro 39: Costos de mantenimiento de un sistema tipo split	114
Cuadro 40: Costos de sistema de entrada de aire.....	114
Cuadro 41: Costos de excavación	115
Cuadro 42: Costos de instalación de ductos.....	115
Cuadro 43: Costos de operación del sistema ICTA	116
Cuadro 44: Costos de operación y mantenimiento	116
Cuadro 45: Comparativo de inversión (Gs.).....	116

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Definición de tecnología alternativa	19
Ilustración 2: Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	22
Ilustración 3: Funcionamiento de un sistema combinado	24
Ilustración 4: Ejemplo de principio acondicionamiento pasivo y activo	25
Ilustración 5: Clasificación de métodos de climatización en edificios energéticamente eficientes.....	27
Ilustración 6: Ejemplos de sistemas pasivos de acondicionamiento en viviendas	28
Ilustración 7: Trazado del recorrido del ducto	35
Ilustración 8: Circulación de aire en un sistema de circuito cerrado	38
Ilustración 9: Circulación de aire en un sistema de circuito abierto.....	38
Ilustración 10: Espaciado entre ductos y zona de saturación	43
Ilustración 11: Ductos por ambiente.....	43
Ilustración 12: Incidencia de la profundidad del sistema.....	44
Ilustración 13: Esquema de funcionamiento de una chimenea solar	49
Ilustración 14: Combinación de un sistema convencional con un sistema ICTA	50
Ilustración 15: Sistema comercial Awadukt Thermo	52
Ilustración 16: Vistas de la Vivienda Prototipo, Caso 1.....	60
Ilustración 17: Proceso constructivo del Caso 1	62
Ilustración 18: Trazado de los ductos subterráneos y mediciones experimentales, Caso 1.....	64
Ilustración 19: Sala Politécnica, Caso 2.....	66
Ilustración 20: Proceso constructivo del Caso 2	68
Ilustración 21: Mediciones experimentales del Caso 2	70
Ilustración 22: Vivienda Takuru, Caso 3	72

Ilustración 23a: Proceso constructivo del Caso 3	73
Ilustración 24b: Proceso constructivo del Caso 3	74
Ilustración 25: Diseño del sistema utilizado en la Vivienda Takuru, Caso 3	76
Ilustración 26: Plano de relevamiento del terreno	88
Ilustración 27: Planificación del trazado	89
Ilustración 28: Excavación de zanjas	92
Ilustración 29: Esquema axonométrico del trazado de ductos	93
Ilustración 30: Colocación de los ductos en la zanja.....	94
Ilustración 31: Caseta de entrada de aire	95
Ilustración 32: Relleno y compactación de las zanjas.....	97
Ilustración 33a: Diseño de la propuesta para el análisis económico.....	104
Ilustración 34b: Diseño de la propuesta para el análisis económico.....	105
Ilustración 35c: Diseño de la propuesta para el análisis económico	106

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enfoca en el estudio, análisis y propuesta de diseño de un sistema de climatización pasiva que mediante la circulación del aire exterior a través de ductos subterráneos aprovecha la temperatura subterránea del suelo para regular el clima interior de una vivienda.

Durante la investigación se estudiarán los fundamentos, el diseño, el sistema constructivo, el funcionamiento, ventajas, desventajas respecto a un sistema de aire acondicionado tradicional tipo Split y los costos asociados a un sistema de ductos subterráneos que regulen la temperatura del aire en una vivienda a través de la captura y disipación de calor, utilizando la masa térmica del suelo.

El fin de este sistema es crear condiciones de temperatura confortables en los ambientes interiores y reducir el consumo energético. Esta es una alternativa sustentable y ecológica a los sistemas electromecánicos de acondicionamiento de aire tradicionales que ahorra energía, mejora el bienestar de los ocupantes y minimiza el impacto que tiene la búsqueda de confort humano sobre el medio ambiente.

El sector de la construcción y los edificios son responsables del 30 al 40% de las emisiones de carbono a nivel global. Esta cifra crece rápidamente y podría superar el 50% para el 2050 si no se toman acciones climáticas ambiciosas como el reemplazo de los sistemas actuales de climatización. La rápida urbanización de países en desarrollo como el nuestro acelera este impacto negativo. Es por eso que los edificios construidos a partir de prácticas sostenibles son la solución más efectiva al cambio climático y pueden producir beneficios ambientales para el mundo.

Ante el colapso de las redes de abastecimiento energético ocasionado por el crecimiento exponencial del consumo eléctrico en las zonas urbanas, el aumento de las emisiones de carbono producidas por la industria de la construcción y el subsecuente calentamiento global, surge la necesidad de adoptar tecnologías constructivas alternativas para lograr construcciones de

menor consumo energético, más eficientes, autónomas y amigables con el medio ambiente.

Antecedentes

Mucho antes del descubrimiento de los sistemas modernos de climatización, los seres humanos empleaban técnicas constructivas de climatización pasiva para lograr el confort térmico dentro del hábitat construido.

Como antecedente reciente a nivel local, se encontró el trabajo del estudio de arquitectura paraguayo José Cubilla & Asociados que implementó un sistema de ductos subterráneos en la construcción de la vivienda "Takuru" en la ciudad de Piribebuy, Paraguay en el año 2016.

Con anterioridad a la construcción de las obras de la Ing. Delia Cohenca, Ing. Gabriela Mezquita, Arq. Yago García-Enriquez y Arq. José Cubilla, existen datos sobre la utilización del sistema de ductos subterráneos para la climatización de espacios en comunidades de inmigrantes en el Chaco paraguayo, conocidos localmente como pozos provenzales o canadienses. En el Trabajo Final de Grado de Graciela Zanoni de la Universidad Nacional de Asunción, titulado "Sistemas Pasivos de Refrigeración aplicables a viviendas unifamiliares urbanas en climas sub-tropicales" (2005), donde se analizan de manera general diversos sistemas de climatización pasiva.

Aún queda mucho por explorar. Y estos antecedentes son el cimiento ideal para construir conocimiento y sustentar una investigación enfocada a la realidad social, climática y constructiva de Paraguay.

Justificación

Esta investigación nos permitirá conocer, desde el punto técnico y constructivo, los fundamentos, requerimientos, debilidades, potencialidades y costos asociados a un sistema de climatización pasiva logrado a través del intercambio de calor entre tierra y aire mediante ductos subterráneos.

Mediante el conocimiento adquirido en este estudio, se podrá evaluar la implementación de esta tecnología alternativa en el diseño de viviendas.

El trabajo final dará a conocer un sistema de climatización alternativo, eficiente, de bajo consumo, ambientalmente amigable y aplicable a viviendas, favoreciendo el confort, reduciendo costos, mejorando su calidad de vida y disminuyendo el impacto sobre el medio ambiente.

Objetivo general

Elaborar una propuesta de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos para el acondicionamiento de Viviendas.

Objetivos específicos

Identificar casos de aplicación de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos en Paraguay.

Determinar las ventajas y desventajas de los sistemas planteados en los casos identificados en el objetivo anterior.

Establecer pautas que optimicen el diseño y construcción de un sistema de climatización de ductos subterráneos para el acondicionamiento pasivo de viviendas.

Determinar los costos de materiales y mano de obra asociados a la construcción del sistema de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos.

Metodología

Revisión de la literatura local e internacional disponible referente a los sistemas de climatización pasiva residenciales, mediante la recopilación y sistematización de la información.

Estudio de las mejores prácticas y referentes nacionales e internacionales que presenten situaciones climáticas similares a la zona en estudio.

Selección de la mejor alternativa para nuestro medio, adaptada a las prácticas constructivas locales.

Análisis de costos de materiales y mano de obra para determinar la viabilidad económica del sistema en viviendas.

Elaboración de conclusiones sobre la factibilidad del sistema de climatización pasiva de ductos subterráneos en nuestro medio.

Aplicabilidad

El trabajo resultante de esta investigación podrá ser aplicado al diseño y construcción de viviendas que por criterios de economía o sustentabilidad se beneficien de la implementación de un sistema de climatización pasiva.

Las familias de recursos limitados que no puedan contar con un sistema de acondicionamiento electromecánico convencional por motivos de costos de instalación, costos de mantenimiento, implantación o ubicación geográfica, encontrarán en este trabajo las bases para la implementación de un sistema de climatización pasivo de ductos subterráneos.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

A fin de comprender el sistema constructivo, las características, ventajas y desventajas de un sistema de climatización pasiva se recopiló los antecedentes, investigaciones y todas las consideraciones teóricas, para definir el campo de estudio, las bases, las variables del problema y los conceptos relevantes del objeto de estudio.

A partir del soporte teórico generado, se estudiarán los casos de aplicación local, sus ventajas y desventajas para luego definir pautas de optimización de diseño y costos de implementación de un sistema de climatización pasiva, con el suelo como disipador de calor.

1.1. Tecnologías Alternativas

El concepto de Tecnología Alternativa nace de la crítica de varios aspectos de la sociedad industrial y de consumo, principalmente en lo que respecta a la participación de la ciencia y la tecnología en el desarrollo de la sociedad. En respuesta, presenta alternativas social y ambientalmente preferibles a la gama de tecnologías existentes haciendo hincapié en opciones más simples, ecológicas, locales, comunitarias, que a menudo implican la autogestión. (Smith, 2005)

Más que dictar tecnologías específicas, las Tecnologías Alternativas definen las políticas para un cambio tecnológico: Cómo se eligen las tecnologías, por quiénes y con qué fin. (Dickinson, 1974)

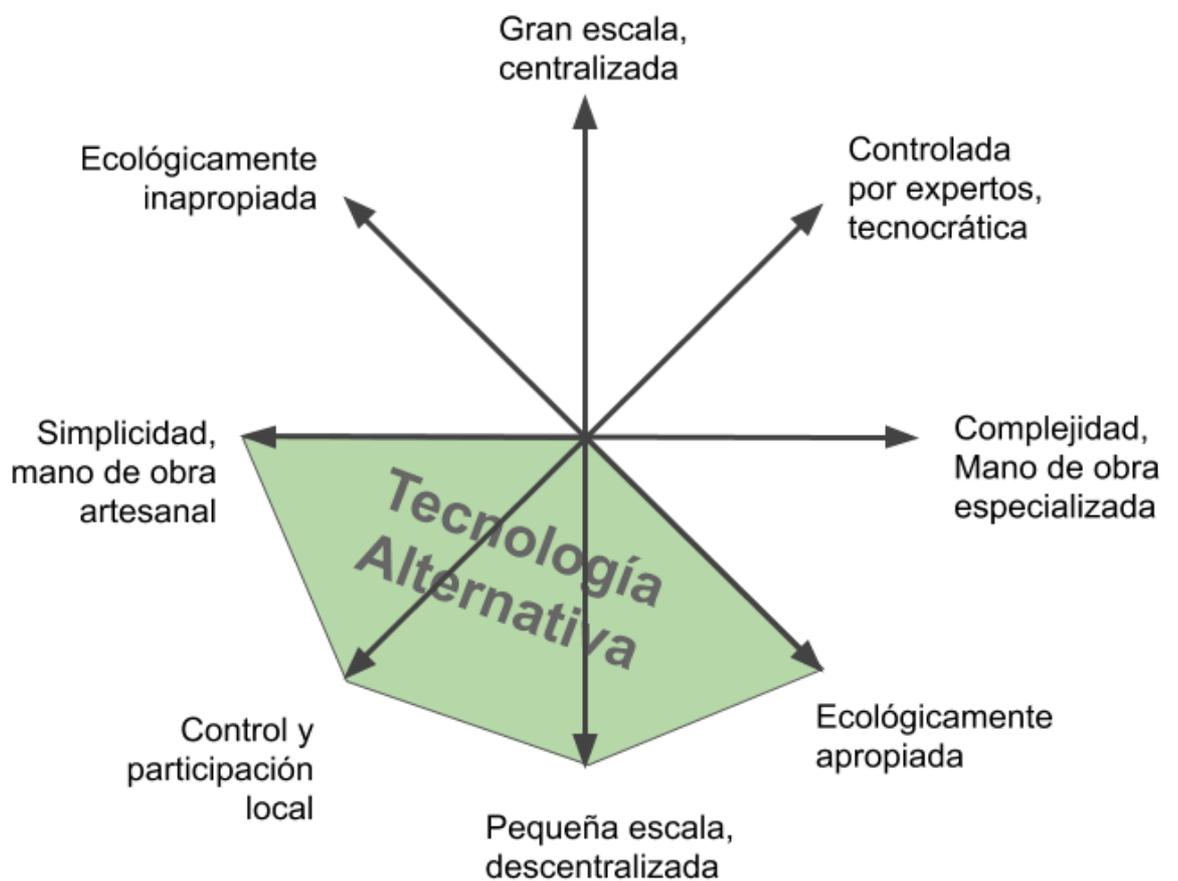
Las tecnologías alternativas son tecnologías social y ambientalmente apropiadas, que apuntan a la autosuficiencia mediante la producción y conservación de energía, vinculando criterios sociales, ambientales y técnicos. (Smith, 2005)

Las tecnologías alternativas emergen de una preocupación sobre el impacto ambiental que genera la sociedad industrial y de consumo, criticando las tendencias tecnológicas de las mismas. Como respuesta a esto, las tecnologías alternativas buscan la transformación radical de la sociedad industrial: una transición a una sociedad sustentable, en armonía con el medio

ambiente y económicamente estable. Las tecnologías alternativas confrontan la visión tecnocrática de la sociedad industrial, que interpreta las tecnologías con un criterio estrictamente técnico, analizando las tecnologías en un sentido más amplio: social y ambiental (Elliot, 2016).

Las tecnologías alternativas poseen contraposiciones claras con respecto a las tecnologías tradicionales propuestas por sociedades tecnocráticas (ver Ilustración 1).

Ilustración 1: Definición de tecnología alternativa



Fuente: elaboración propia en base a Smith, 2005

Las tecnologías alternativas tienen objetivos sociales y ambientales, que promueven energías renovables, producción de alimentos orgánicos, viviendas y comunidades ecológicas, talleres cooperativos e infraestructuras de pequeña escala para la distribución de recursos. (Elliot, 2016)

Cuadro 1: Diferencias entre tecnología alternativa y tecnología convencional

Tecnología Alternativa	Tecnología Convencional
Simple	Compleja
Local y participativa	Tecnocrática
Pequeña Escala	Gran escala
Descentralizada	Centralizada
Ecológicamente amigable	Ecológicamente negativa

Fuente: elaboración propia basado en Smith, 2005

Una tecnología alternativa es aquella compuesta por elementos y sistemas simples que la hace accesible y participativa, y se caracteriza también por su escala pequeña a mediana, su descentralización y por ser amigable con el medioambiente (ver Cuadro 1).

Las tecnologías alternativas plantean técnicas constructivas y estrategias de diseño para adaptar edificios de manera que aprovechen energías renovables y medios naturales para la reducción del consumo energético y el impacto ambiental, mejorando la calidad de vida de las personas y facilitando el confort térmico bajo las condiciones ambientales del entorno construido.

Las construcciones pueden adoptar diversas soluciones tecnológicas pasivas para reducir pérdidas o transmisión de calor, prevenir las fugas de aire, mejorar la ganancia solar, lograr una ventilación confortable, reducir la demanda energética, y aplicar energías renovables para su funcionamiento (ver Cuadro 2).

Cuadro 2: Principios básicos de las construcciones pasivas

Principios	Soluciones tecnológicas
Reducción de pérdidas de transmisión	Aislación térmica de paredes, pisos y techos Aislación térmica de partes transparentes Aislación térmica de puentes térmicos
Prevención de fugas de aire	Construcción hermética
Mejoramiento de ganancia solar	Prevención de sobrecalentamiento
Ventilación confortable	Calidad del aire a través de ventilación controlada Intercambiador de calor aire-aire eficiente Intercambiadores de calor tierra-aire Reducción o eliminación de sistemas activos
Reducción de demanda energética	Calefones solares Electrodomésticos de bajo consumo
Aplicación de energía renovable	Energía Solar Energía Eólica

Fuente: elaboración propia

Las tecnologías alternativas presentan estrategias eficientes que contribuyen a la reducción de las necesidades térmicas de los edificios promoviendo el confort térmico, manteniendo la calidad del aire y reduciendo el consumo energético necesario para el acondicionamiento.

El confort térmico es definido por la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) como "el estado de ánimo que expresa satisfacción con el entorno térmico". Entendido de esta manera el confort térmico es una propiedad dinámica y subjetiva. Las personas adoptan distintos comportamientos para adaptarse a las características de un clima. Esta respuesta está condicionada por factores culturales, sociales, económicos y ambientales, varía de una persona a otra y puede adquirir diversas formas. Una persona es capaz de elegir una vestimenta adecuada al clima, ejercer control sobre su entorno, modificar su nivel de actividad, cambiar de postura o moverse de lugar para alcanzar un estado de confort térmico. (Santamouris, 2007)

1.1.1. Construcción Sostenible mediante Tecnologías Alternativas

A finales de septiembre del 2015, la Organización Naciones Unidas presentó una agenda global con metas y Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS). Estos ambiciosos objetivos, adoptados por líderes mundiales, se clasifican en 17 temáticas que proponen formas para erradicar la pobreza, mejorar las condiciones de vida de la población y lograr la rápida transición a una economía baja en emisiones de carbono y resiliente al cambio climático. Dentro de estas temáticas de trabajo se proponen tres ejes que tienen relación con la construcción sostenible:

- Energía Asequible y no Contaminante
- Ciudades y Comunidades Sostenibles
- Producción y Consumo Responsables

La agenda tiene presencia en Paraguay a través de las acciones de diversas empresas y organizaciones comprometidas con el desarrollo sostenible. Esta situación genera un ambiente propicio para la proliferación de

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

tecnologías alternativas en el área de la construcción, promoviendo técnicas y sistemas constructivos más amigables con el medio ambiente.

Ilustración 2: Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: ONU

Las tecnologías alternativas colaboran con 8 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ver Cuadro 3), convirtiéndolos en tecnologías apropiadas para alcanzar las metas de sostenibilidad y enfrentar los desafíos climáticos de los próximos años.

Cuadro 3: Las tecnologías alternativas y los ODS

Característica de las tecnologías alternativas	ODS
Mejora la calidad de vida, la salud y el bienestar de las personas mediante el confort térmico, la calidad del aire y la reducción de emisiones de carbono.	
Las tecnologías alternativas utilizan energías renovables, asequibles y no contaminantes como la energía geotérmica y solar	
La apropiación de las tecnologías alternativas por parte de la comunidad genera trabajo mediante el empleo de mano de obra local, impulsando la economía.	
Las tecnologías alternativas impulsan la innovación y contribuye a infraestructuras resilientes.	

Las viviendas sostenibles construidas en base a tecnologías alternativas son la base de comunidades y ciudades sostenibles.	
Las tecnologías alternativas utilizan principios de economía circular y aprovechamiento de recursos.	
Su bajo consumo y utilización de energías renovables reducen las emisiones de carbono ayudando a combatir el cambio climático.	
Su construcción y operación es amigable con el medioambiente, mejorando la biodiversidad y preservando la ecología.	

Fuente: Elaboración propia

1.2. Acondicionamiento térmico de los edificios

Existen diversas estrategias, tipos, elementos y sistemas de acondicionamiento térmico que pueden ser aplicadas a la construcción. Estos tienen como objetivo regular las condiciones climáticas de un espacio para alcanzar el confort humano. La zona de confort es definida como el rango de condiciones climáticas dentro del cual la mayoría de las personas se sienten cómodas, sin sentir frío ni calor. (Givoni, 1992)

1.2.1. Sistema de acondicionamiento activo

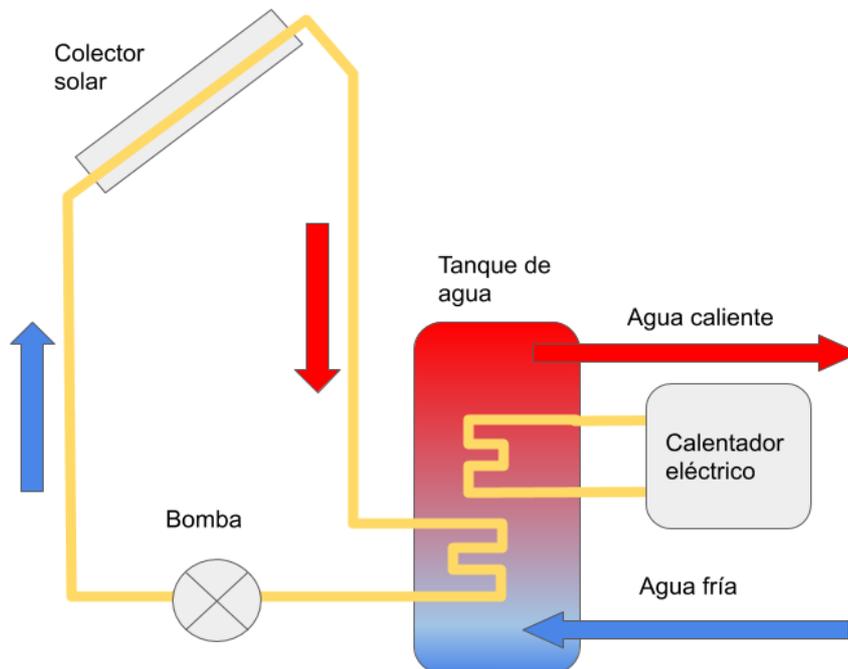
Los sistemas de acondicionamiento activos son aquellos que utilizan equipamientos electromecánicos y energía adicional para controlar las condiciones térmicas de un espacio. El sistema activo puede ser alimentado por energías no renovables (combustibles fósiles) o renovables (energía solar, eólica, etc.) (Agrawal, 1989)

Los sistemas activos utilizan colectores, unidades de almacenamiento, mecanismos de transferencia y sistemas de distribución de energía. Este tipo de sistemas utiliza uno o más fluidos que colectan, transfieren, almacenan y distribuyen la energía. Estos fluidos circulan mediante bombas y ventiladores (Agrawal, 1989).

1.2.2. Sistema de acondicionamiento combinado

Un sistema combinado utiliza estrategias pasivas y activas para el acondicionamiento térmico con el fin de maximizar el desempeño del sistema. Las estrategias pasivas no descartan la utilización de los medios mecánicos propios de los sistemas activos para incrementar el desempeño del sistema (ver ilustración 3) siempre y cuando los costos de operación se mantengan bajos con relación a la cantidad de energía producida.

Ilustración 3: Funcionamiento de un sistema combinado



Fuente: Elaboración propia

1.2.3. Sistema de acondicionamiento pasivo

Los sistemas de acondicionamiento pasivo son aquellos que utilizan medios naturales para la climatización de edificios. En los sistemas pasivos todas las funciones de colección, almacenamiento y distribución son llevadas a cabo por los materiales de construcción mismos. Estos sistemas pueden ser utilizados en combinación con sistemas de acondicionamiento activo para una mayor eficiencia. (Agrawal, 1989)

Ilustración 4: Ejemplo de principio acondicionamiento pasivo y activo

Principio Pasivo



Principio Activo



El termo conserva el calor por las características de aislamiento térmico de su envoltorio.

La cafetera eléctrica conserva el calor gracias a la resistencia eléctrica instalada en su base.

Fuente: Elaboración propia

1.2.3.1. Acondicionamiento térmico natural como fundamento del sistema pasivo

El acondicionamiento térmico natural es un conjunto de técnicas de construcción sostenible cuyo objetivo es climatizar edificios por medios naturales. Comprende cualquier sistema que apunta a minimizar o eliminar medios mecánicos de aire acondicionado y reducir la demanda energética de climatización mecánica. (Samani, 2016)

1.2.3.2. Estrategias de acondicionamiento térmico pasivo

El enfriamiento pasivo de edificios se categoriza en tres grupos generales de acuerdo con la función de los elementos que lo componen. Dentro de estos tres grupos se encuentran clasificados los distintos métodos para alcanzar el confort térmico. (Geetha, 2012)

➤ Prevención y reducción del calor

La estrategia consiste en disminuir la captación de calor. Un edificio debe adaptarse al clima de la región y su microclima y para ello es muy importante minimizar la captación de calor de un edificio a modo de mejorar la efectividad de las técnicas de enfriamiento pasivo. (Geetha, 2012)

El diseño del sitio está influenciado por consideraciones económicas, normativas y entorno inmediato. Todos estos factores participan en el diseño del edificio, incidiendo en la exposición solar y la ventilación disponible. El control solar es la medida de diseño más importante para prevenir la captación de calor. El uso de dispositivos para generar sombra y atenuar la incidencia de la radiación solar dentro de los edificios corresponde a esta estrategia.

➤ **Regulación Térmica**

Esta estrategia pretende modificar la captación de calor del sistema. La modulación térmica de un edificio puede ser lograda de 2 maneras.

Primera: la masa térmica del edificio (muros, pisos y divisorias construidas de materiales con alta capacidad de calor) absorbe calor durante el día y regula la magnitud de los cambios de temperatura en el interior, reduciendo los picos de temperatura y transfiriendo parte del calor absorbido durante el día al ambiente durante horas de la noche. El resto de la carga de enfriamiento puede ser cubierta por otras técnicas pasivas de enfriamiento.

Segunda: el edificio es pre-enfriado durante la noche mediante ventilación nocturna. El frío adquirido durante la noche es almacenado se transfiere al ambiente durante las primeras horas de la mañana, reduciendo el consumo de energía hasta en un 20% (Geetha, 2012).

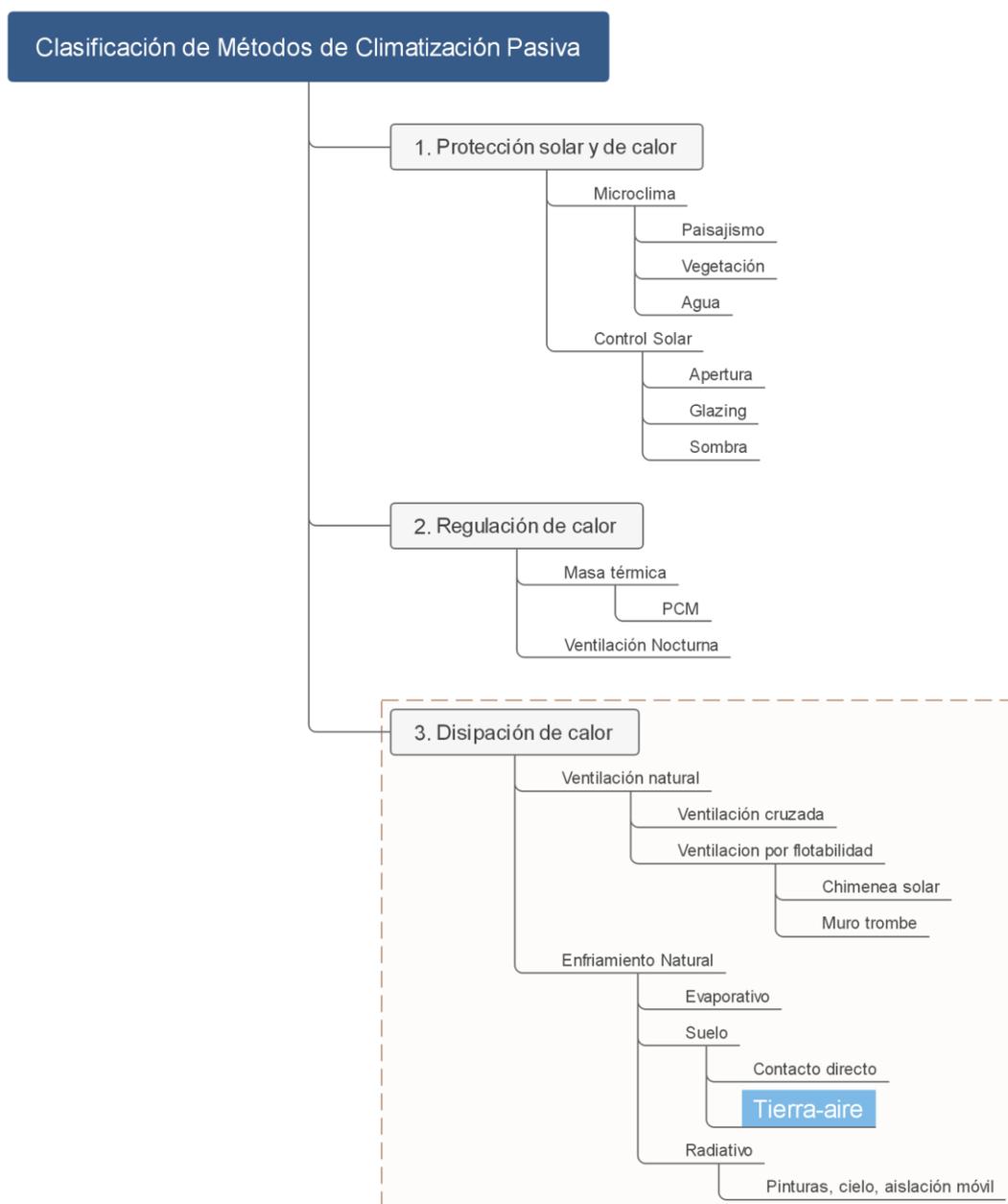
➤ **Disipación de calor**

Disipar el calor significa eliminar el calor interno transfiriéndolo al exterior de un sistema. En muchos casos, la prevención y modulación de la captación del calor no son suficientes para mantener las temperaturas interiores controladas. En estos casos se recurre a estrategias más avanzadas que incluyen la transferencia natural del calor de ambiente a disipadores naturales como la atmósfera o el suelo. (Geetha, 2012)

Los disipadores naturales como el suelo, el aire y el agua, próximos al edificio pueden ser empleados efectivamente para manejar parcial o totalmente la demanda de enfriamiento. Un buen entendimiento de estos disipadores es esencial para tomar una decisión correcta al momento de diseñar un sistema de acondicionamiento pasivo (Samuel, 2013)

El enfriamiento natural se refiere al uso de disipadores de calor naturales para disipar el exceso de calor en espacios interiores. Estos métodos incluyen: ventilación natural, enfriamiento evaporativo, enfriamiento por medio del suelo y enfriamiento radiativo, así como también el uso de sistemas basados en PCM (Phase Change Material), (Geetha, 2012).

Ilustración 5: Clasificación de métodos de climatización en edificios energéticamente eficientes



Fuente: Elaboración Propia, en base a Geetha, (2012)

Según Santamouris, los elementos de un sistema de enfriamiento pasivo pueden ser clasificados en tres categorías principales en base a su función: Protector de Calor, Regulador de Calor, Disipador de Calor (ver Ilustración 6).

Ilustración 6: Ejemplos de sistemas pasivos de acondicionamiento en viviendas



Protector de Calor
Parasoles



Regulador de Calor
Masa térmica



Disipador de Calor
Construcción Semi-enterrada

Fuente: Plataforma de Arquitectura

Cuadro 4: Elementos del sistema pasivo

	Función	Ejemplos
Protector de Calor	Proteger de la ganancia de calor y la incidencia solar	Paisajismo, espacios semicubiertos, forma del edificio, orientación del edificio, parasoles, aislación y terminaciones exteriores. Ejemplo: parasoles verticales
Regulador de Calor	Atenuar y modular los picos de temperatura interna con la descarga de calor tardía	Masa térmica del edificio, materiales con alta capacidad térmica como ladrillos y hormigón. Ejemplo: muros de gran porte en interiores
Disipador de Calor	Transmitir el exceso de calor a un disipador natural de menor temperatura	Enfriamiento por contacto con el suelo, enfriamiento convectivo y evaporativo a través del aire, agua y enfriamiento radiativo. Ejemplo: construcción semienterrada.

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las estrategias de disipación de calor encontramos los ductos subterráneos intercambiadores de calor tierra-aire (ver Ilustración 5).

En términos de arquitectura, estos elementos de acondicionamiento pasivo pueden materializarse de diversas formas y a menudo se implementan en combinación.

- **El suelo como disipador de calor**

El suelo cambia de temperatura más lentamente que el aire de ambiente. Mientras más profundo se adentra uno en el suelo, más se atenúa la temperatura. Y a una cierta profundidad el suelo permanece en una temperatura constante que es levemente mayor a la temperatura promedio anual del aire. Como resultado, el suelo puede utilizarse como disipador de calor durante el verano. Su potencial de enfriamiento puede ser utilizado directamente cuando la envolvente del edificio está en contacto con el suelo (edificios semienterrados), a través de intercambiadores de calor tierra-aire o intercambiadores de calor accionados por agua.

Debido a la alta inercia térmica del suelo, el desfase de tiempo que existe entre la temperatura en la superficie y la temperatura el suelo, aumenta con la profundidad. Por esto, a una cierta profundidad, la temperatura del suelo es más baja que la temperatura exterior en verano y más alta en invierno. Basado en modelos matemáticos se puede predecir la temperatura de la superficie del suelo y posteriormente la del suelo a profundidad. (Santamouris, 2007)

El rendimiento térmico de un sistema ICTA depende en gran parte de las propiedades termofísicas del suelo. El potencial del sistema ICTA está relacionado a la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada y la temperatura del suelo (que actúa como un disipador térmico) y la eficiencia del intercambio térmico entre ambos. (Chiesa, 2017)

Entre las propiedades termofísicas, el sistema ICTA es influenciado profundamente por la conductividad térmica del suelo, calor específico y densidad. Estas tres propiedades del suelo pueden ser expresadas como difusividad térmica:

$$\text{Difusividad Térmica} = \text{Conductividad térmica} / (\text{Densidad} \times \text{Calor específico})$$

Por lo tanto, la difusividad térmica es la propiedad del suelo más importante en un sistema ICTA. Una alta difusividad térmica significa mayor velocidad de transferencia de calor, lo que se traduce en una transferencia de calor mayor y más rápida entre suelo adyacente al sistema y el suelo exterior.

Sin una alta difusividad térmica, el calor se acumula en las capas de suelo próximas a los ductos y no ocurre intercambio, produciendo la saturación térmica del suelo y reduciendo el desempeño del sistema ICTA. (Agrawal, 2018)

Sin embargo, la temperatura del suelo a 10 cm es mayor a la del aire durante la mayor parte del día. Entre las 7 y las 9 la temperatura del aire y el suelo a 10 cm de profundidad son iguales. (Giovini, 1991)

En relación a los disipadores de calor, cabe mencionar que como principio básico, no hay límites geográficos de utilización del suelo como enfriador. Pero la aplicación del sistema se limita a sitios donde la temperatura del suelo en verano es baja y donde el potencial de energía sea fácil de aprovechar. (Santamouris, 2007)

El enfriamiento geotérmico es recomendable para lugares donde la fluctuación de la temperatura anual es alta, regiones con calor y frío extremos. Este tipo de clima prevalece en regiones sin litoral, alejadas del ecuador debido a que no cuentan con el efecto moderador del mar ni la estabilidad estacional propias de regiones ecuatoriales (Samuel, 2013)

Los registros climáticos de una zona particular son importantes para conocer la aptitud de un sistema en una localidad particular. La factibilidad técnica antes de realizar la implementación del sistema puede ser identificada observando los datos meteorológicos:

- Máxima temperatura de ambiente
- Mínima temperatura de ambiente
- Promedio de temperatura de ambiente
- Humedad relativa
- Temperatura del suelo a profundidades mayores a 2 metros

- Tipo de suelo

La forma y tamaño de las partículas del suelo afectan la aglomeración de estas y definen la 'estructura del suelo' (ver Cuadro 5). La estructura del suelo controla la conductividad térmica en cierta medida. Entre los minerales existentes en el suelo, el cuarzo tiene una gran conductividad térmica, por lo tanto, un suelo con alto contenido de cuarzo logra una mayor transferencia de calor. Los factores ambientales que influyen en la conductividad térmica del suelo incluyen la temperatura, el contenido de humedad y la densidad. La conductividad térmica de un suelo húmedo es mayor que la de un suelo seco. El área de contacto físico entre partículas crece con el aumento de la densidad, mejorando la conductividad térmica. Así también, el incremento en la temperatura del suelo aumenta su conductividad térmica. (Agrawal, 2018)

Cuadro 5: Efectos de las propiedades térmicas del suelo en el rendimiento de un sistema ICTA

Difusividad térmica	Suelos con mayor difusividad térmica pueden transferir mayor calor del suelo adyacente al ducto enterrado al suelo circundante.
Conductividad térmica	Suelos con mayor conductividad térmica en proximidad de un sistema ICTA mejoran la transferencia de calor
Contenido de humedad del suelo	El contenido de humedad de suelo (hasta su saturación) mejora la conductividad térmica del suelo, lo que aumenta el rendimiento térmico del sistema ICTA
Densidad del suelo	El suelo denso o compacto mejora la conductividad térmica y el desempeño del ICTA

Fuente: Elaboración propia

- Estrategias de Control de Temperatura del Suelo

De la misma forma, cambiando las propiedades de la superficie del suelo, la temperatura del suelo puede aumentar o disminuir. Esto depende de la conductividad del material y el albedo solar. El suelo húmedo o cubierto por gravilla, por ejemplo, presenta una temperatura hasta 18 grados menos que el suelo descubierto, mientras que, a menor profundidad, mayor variación de temperaturas.

El rendimiento de sistemas ICTA poco profundos puede ser mejorado aplicando diversos tratamientos de superficie:

- Superficies húmedas bajo sombra

- Superficies pintadas en negro, cubiertas con vidrio
- Superficies cubiertas con vegetación

Para llevar a cabo estas estrategias se pueden utilizar de técnicas de: Sombreado; humectación; oscurecimiento; aclaramiento; acristalamiento; cobertura (ver Cuadro 6).

Cuadro 6: Técnicas de control de temperatura del suelo

Técnicas	Función	Ejemplo
Sombreado	Cubrir la superficie con sombra mediante vegetación o elementos constructivos	Techos, árboles
Humectación	Mantener el suelo húmedo mediante irrigación o cuerpo de agua	Estanques, regadío
Oscurecimiento	Modificar la reflectividad del suelo para aumentar la absorción de calor	Pinturas absorbentes
Aclaramiento	Modificar la reflectividad del suelo para disminuir la absorción de calor	Pinturas reflectivas
Acristalamiento	Atrapar el calor cubriendo la superficie del suelo con material acristalado	Superficies vidriadas
Cobertura	Cubrir la superficie del suelo	Cortezas, piedras

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento adecuado de la superficie del suelo puede contribuir al ahorro de energía durante el funcionamiento del sistema y a la optimización de la longitud de los ductos enterrados. El objetivo consiste en modificar las condiciones de temperatura del subsuelo en donde se instalan los ductos a través de diversas estrategias de climatización pasiva.

- **Ductos Subterráneos como tecnología alternativa para climatización pasiva**

La utilización de ductos subterráneos se encuadra dentro de las técnicas de disipación de calor mediante la utilización de la masa térmica del suelo y su interacción con el aire.

En la literatura científica existen varios términos técnicos para referirse a los ductos subterráneos:

- Tubos terrestres
- Caños enterrados o subterráneos
- Ductos enterrados o subterráneos

- Intercambiador de calor de aire-a-suelo
- Caños de aire subterráneos
- Intercambiador de calor tierra-aire
- Intercambiador de calor subterráneo
- Sistema de túneles de tierra-aire
- Intercambiador de calor acoplado a tierra
- Hipocausto
- Pozo provenzal
- Pozo canadiense (Paredes, 2017)
- Conductos enterrados (Zanoni, 2005)

De alguna u otra manera, estos términos se refieren a la misma tecnología: un elemento enterrado bajo tierra, al cual para efectos de esta investigación denominaremos ducto subterráneo, a través del cual circula aire u otra sustancia que actúa como intercambiador de calor entre dos sistemas: el disipador natural y el aire.

Para esta investigación se utilizará el término intercambiador de calor tierra-aire, ICTA por sus siglas, para definir el sistema de climatización pasiva compuesto por ductos subterráneos que sirven para intercambiar calor entre tierra y aire.

El intercambio de calor entre el aire que circula dentro del ducto enterrado y el subsuelo se rige en gran medida por la diferencia de temperatura entre el suelo y el aire.

Se sugiere que la temperatura natural del subsuelo a una profundidad mayor a 3 metros y la media anual de temperatura de ambiente sean iguales y la diferencia de temperatura entre el promedio anual de la máxima/mínima y la temperatura del subsuelo sea mayor a 7-8 C para que el enfriamiento o calentamiento mediante un sistema intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) sea factible. El sistema es recomendado para condiciones ambientales duras donde existan picos de temperatura en verano o invierno (Agrawal, 2018).

La presencia de agua subterránea mejora la transmisión de calor de los intercambiadores de calor tierra-aire sin embargo complica su construcción, ya que se debe evitar la presencia de agua dentro de los ductos.

El potencial del enfriamiento mediante el suelo es limitado en climas fríos, donde no hay necesidad de enfriamiento, y climas donde la temperatura del suelo es demasiado alta. (Santamouris, 2007)

El sistema de ductos subterráneos es utilizado en una variedad de climas. Desde Europa Occidental (Alemania, Suiza) hasta lugares más cálidos como India, particularmente para invernaderos. El sistema está ganando aceptación en el norte de Europa, particularmente en Finlandia y Suecia (Thevenard, 2007), en América Latina, un estudio demuestra un alto potencial de enfriamiento mediante el suelo en varias regiones climáticas de Brasil (Alves y Schmidt, 2015), en otro estudio, análisis numéricos y experimentales validan la utilización del sistema para una casa de 30 metros cuadrados en la ciudad de Viamão, Brasil (Vaz et al, 2011)

- **Funcionamiento de los ductos subterráneos**

Los edificios se pueden acondicionar utilizando disipadores naturales de calor: El aire de ambiente; La atmósfera superior; y el Suelo subterráneo. El mecanismo siempre es el mismo: el intercambio de calor entre dos medios.

Los ductos subterráneos son un sistema de acondicionamiento pasivo que se basa en la disipación de calor para la eliminar el exceso de calor del aire que ingresa a un edificio a través del suelo el suelo como disipador natural de menor temperatura. Para que la disipación del exceso de calor a través del suelo sea efectiva deben cumplirse dos precondiciones: la disponibilidad de un disipador ambiental de calor con diferencia suficiente de temperatura para la transferencia de calor; la eficiencia del acoplamiento térmico entre el edificio y el disipador.

La técnica más común para el acoplamiento térmico de edificios y otras estructuras con el suelo es la utilización de ductos subterráneos. Estos intercambiadores consisten en ductos enterrados en el suelo en donde un sistema de circulación de aire mueve el aire a través de los ductos que luego

se mezcla con el aire interior del edificio, eliminando el exceso de calor en el aire de entrada y regulando la temperatura en el interior del edificio.

Utilizando el potencial térmico del suelo es posible dar las condiciones de temperatura necesarias para el confort de los habitantes de una vivienda, disminuyendo su consumo de energía eléctrica, los costos durante todo el ciclo de vida del edificio y el impacto sobre el medio ambiente.

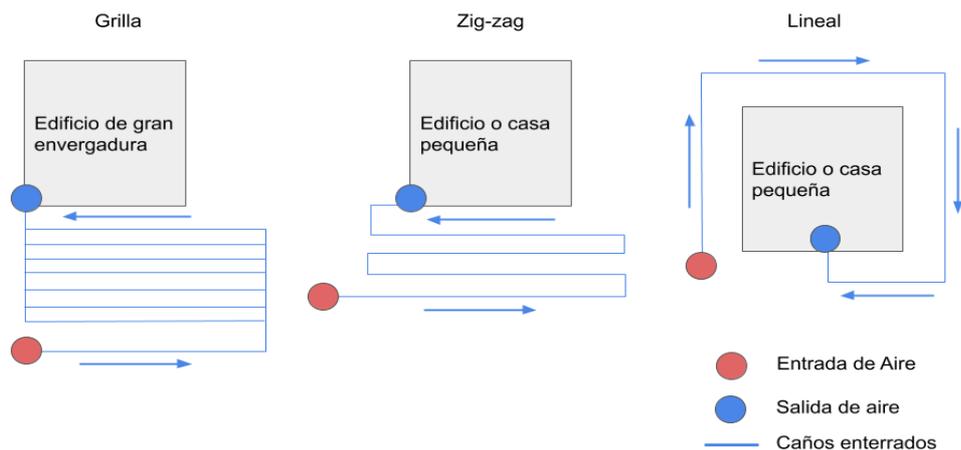
- Tipos de ductos subterráneos

Teniendo en cuenta su disposición, orientación, circuito y características de sus elementos, es posible identificar distintos tipos de ductos subterráneos.

Según la disposición de los ductos

La disposición de los ductos es una decisión importante. Al igual que en el diseño de ductos de aire acondicionado, el diseño ideal de un sistema ICTA utiliza ductos estándar en la cantidad mínima y necesaria de desarrollo, con la menor pérdida de presión.

Ilustración 7: Trazado del recorrido del ducto

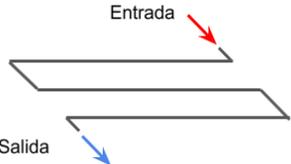
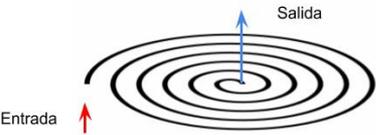
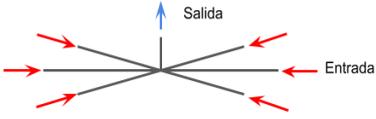
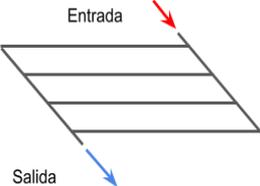


Fuente: Elaboración propia

Se debe planificar adecuadamente el trazado de las cañerías (ver Ilustración 7) y su ubicación con respecto al entorno para obtener un sistema eficiente y económico.

Según su trazado, los ductos pueden identificarse como lineales, en espiral, radiales, grilla o ramificados (ver Cuadro 7).

Cuadro 7: Trazado de los ductos subterráneos

Lineal	<p>La manera más eficiente de colocar los ductos. Los ductos conectados en serie ofrecen un caudal uniforme y facilidad de limpieza. Los cambios de dirección deben realizarse con curvas de gran radio para disminuir la pérdida de presión.</p>	 <p>Esquema de disposición lineal</p>
Espiral	<p>Común en ductos flexibles. El recorrido se desarrolla en forma de espiral para aprovechar el área de excavación. Normalmente, por su disposición, poseen radios que facilitan el flujo de aire uniforme en los cambios de dirección.</p>	 <p>Esquema de disposición en espiral</p>
Radial	<p>En este esquema, varios tramos de ductos convergen en una misma salida, en una disposición radial y concéntrica. Este esquema permite maximizar la superficie de transferencia de calor concentrando el caudal en una única salida.</p>	 <p>Esquema de disposición radial</p>
Grilla	<p>Los tramos de ductos paralelos se interconectan formando una grilla. En un sistema en grilla, si uno de los ductos se bloquea, el sistema puede seguir funcionando. Como contrapartida, si el sistema no está correctamente balanceado, la mayor parte del flujo de aire podría circular por un solo ducto, restando eficiencia al sistema.</p>	 <p>Esquema de disposición en grilla</p>
Ramificado	<p>Al igual que el sistema de grilla, si la ramificación no se encuentra bien balanceada, la distribución podría fallar ya que el aire, como cualquier fluido compresible, toma el camino de menos resistencia.</p>	 <p>Esquema de disposición ramificada</p>

Fuente: Elaboración propia

Estos trazados pueden usarse en combinación. Para su elección se deben considerar factores de implantación, constructivos y económicos.

Según su orientación

La orientación se refiere a la disposición de los ductos enterrados con respecto al plano vertical y el plano horizontal (ver Cuadro 8). Según su posición con respecto a estos planos, el sistema puede ser horizontal si se entierra en un plano paralelo a la superficie o vertical si se entierra en un plano perpendicular al plano de la superficie.

Cuadro 8: Clasificación según la orientación

Sistema Horizontal	Enterrado a lo largo de una superficie. Los ductos se extienden en un plano horizontal bajo la superficie del suelo.
Sistema Vertical	Enterrados en dirección vertical, como en un pozo. Los ductos se extienden en un plano vertical.

Fuente: Elaboración propia

La orientación más comúnmente utilizada y la más económica es la horizontal. Los sistemas verticales tienen lugar en urbanizaciones densas o lugares con espacio limitado.

Según circuito del aire

El circuito describe cómo es la circulación del aire dentro del sistema.

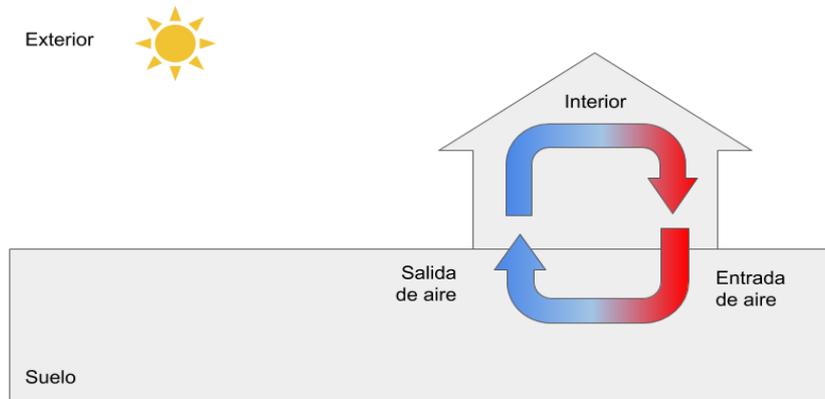
Cuadro 9: Clasificación según el circuito de aire

Circuito Cerrado	El sistema puede ser de circuito cerrado (closed loop), donde el aire del edificio recircula por los ductos subterráneos (ver Ilustración 8). El sistema de circuito cerrado no es muy favorable porque por un lado no logra cumplir con los requisitos de un edificio (aire fresco) y por el otro no puede proveer de calor al edificio.
Circuito Abierto	Circuito abierto (open loop), donde el aire exterior ingresa a través de los ductos subterráneos para ventilar el edificio. El aire luego sale a través de una abertura (ver Ilustración 9)

Fuente: Elaboración propia

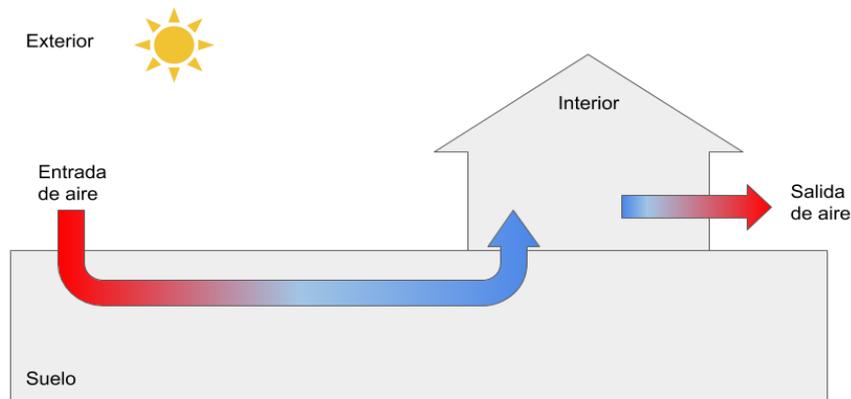
De optarse por un sistema de circuito cerrado, se deberá buscar un mecanismo que permita la renovación del aire interior.

Ilustración 8: Circulación de aire en un sistema de circuito cerrado



Circuito cerrado
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9: Circulación de aire en un sistema de circuito abierto



Circuito abierto
Fuente: Elaboración propia

Componentes de los ductos subterráneos

El sistema de ductos subterráneos se compone de diversos componentes con características que influyen en el funcionamiento y la eficiencia del sistema. Conocer estos componentes y su influencia en el desempeño del intercambiador de calor tierra-aire es fundamental para el planteamiento del diseño. Santamouris (2013) documenta más de 30 casos de estudio con construcciones monitoreadas y modelos matemáticos validados y concluye que la eficiencia del sistema varía en función de sus características: longitud, diámetro de los ductos, el flujo de aire, la profundidad, las características térmicas del suelo, los materiales utilizados,

etc. Dicho de otra manera, la eficiencia del sistema depende de las características y las consideraciones de diseño.

Materialidad

Los ductos en un sistema ICTA pueden estar contruidos de diversos materiales como plástico, aluminio, cobre, hormigón, zinc, metal o material cerámico. El material de los ductos no influye de manera significativa en la temperatura de salida (Singh, 2018) siendo los factores de costo, mantenimiento, facilidad de instalación, higiene y durabilidad los más importantes a la hora de elección de material de construcción para los ductos. En este sentido, el PVC es el material que más ventajas ofrece por su bajo costo, su resistencia a la corrosión, propiedades antimicrobianas y facilidad de instalación. (Agrawal, 2018).

En cualquier caso, los ductos a utilizar deberán ser nuevos para asegurarse de que no acarrean bacterias o químicos indeseados. El aire en el interior de los tubos debe ser limpio y salubre para no causar problemas respiratorios durante el uso. Por esto es recomendable la utilización de caños de PVC tratados con recubrimientos interiores antimicrobianos. (Buydens, 2016)

Las propiedades termofísicas del ducto en un sistema ICTA son parámetros que afectan el rendimiento. Las propiedades termofísicas son: Conductividad; Densidad; y Rugosidad.

Cuadro 10: Potencial de enfriamiento y calefacción de sistemas ICTA, según material

Material del ducto	Conductividad (Wm K⁻¹ -1)	Potencial de enfriamiento (kWh/año)	Potencial de calefacción (kWh/año)
PVC	0,24	933,96	388,81
Acero	57	939,89	391,25
Cobre	395	939,92	391,27

Fuente: Singh, 2018

Existen materiales no recomendados para su uso en sistemas de intercambio de calor tierra y aire. Los motivos para evitar la utilización de estos

caños son diversos (ver Cuadro 11). Entre ellos podemos citar costo del material, facilidad de instalación, costo de mantenimiento, durabilidad, salubridad, resistencia, versatilidad, etc.

Cuadro 11: Materiales no recomendados

Caños corrugados	Almacenan agua en los bordes de los ductos y promueven el crecimiento de hongos y bacterias que pueden ocasionar problemas respiratorios.	
Caños de hormigón	Son costosos, difíciles de manejar, absorben agua y pueden albergar algas, moho y bacterias.	
Caños cerámicos	Son frágiles, absorben agua, pueden albergar algas, moho y bacteria.	
Caños de hierro o galvanizados	Pueden oxidarse, descomponiéndose o tapando drenajes.	
Caños perforados para drenaje	Los caños perforados utilizados para drenaje pueden permitir el ingreso de organismos, agua subterránea e incluso gas radón.	
Otros materiales rugosos	Cualquier material rugoso no liso agrega resistencia al sistema y dificulta la circulación de aire dentro de los tubos.	

Fuente: Elaboración propia

Características Geométricas del Ducto

Las características geométricas del ducto en un intercambiador de calor tierra-aire son parámetros clave que afectan el rendimiento general del sistema. Las características geométricas incluyen: Sección longitudinal; Sección transversal; Longitud; Diámetro; y Espesor.

Cuadro 12: Tipos de ducto según sección longitudinal

Corrugado Flexible	Los caños corrugados flexibles permiten versatilidad en el trazado del sistema. Son recomendados para sistemas en espiral.	
Perforado Liso	Los caños perforados lisos permiten desagotar el agua generada por condensación	
Corrugado Perforado	Los caños corrugados perforados comúnmente utilizados para drenaje combinan las características de los dos tipos de caño anteriores	

Fuente: Elaboración propia

Al momento de diseñar un sistema intercambiador de calor tierra-aire debe tenerse en cuenta cómo incide la geometría del ducto en el desempeño y la efectividad (ver Cuadro 12).

Rugosidad del ducto

La rugosidad del ducto es un factor importante que influye en el desempeño del sistema. Si bien las superficies rugosas tienen un mayor coeficiente de transferencia de calor, debido a la mayor superficie de contacto, también ocasionan una pérdida de presión en el flujo del aire. Idealmente, el diseño del ducto debe proveer la máxima transferencia con la mínima pérdida de presión.

Longitud del ducto

La longitud puede variar entre 10 a 100 metros. Mientras más largos los ductos, más eficiente la transferencia de calor, pero al mismo tiempo aumenta el costo y la dificultad del aire para circular por el sistema. Los ductos cortos no ofrecen superficie suficiente de intercambio para enfriar el aire mientras que ductos muy largos no mejoran sustancialmente la eficiencia. En espacios más grandes como espacios de estar o comedores se recomienda la utilización de dos tubos para climatizarlos de forma efectiva. Para habitaciones ubicadas en pisos superiores, los tubos pueden subir por el

interior de las paredes hasta respiraderos. Mientras más tubos subterráneos, mejor. Una casa común de 2 a 3 dormitorios puede tener de 4 a 7 tubos subterráneos (Buydens, 2016).

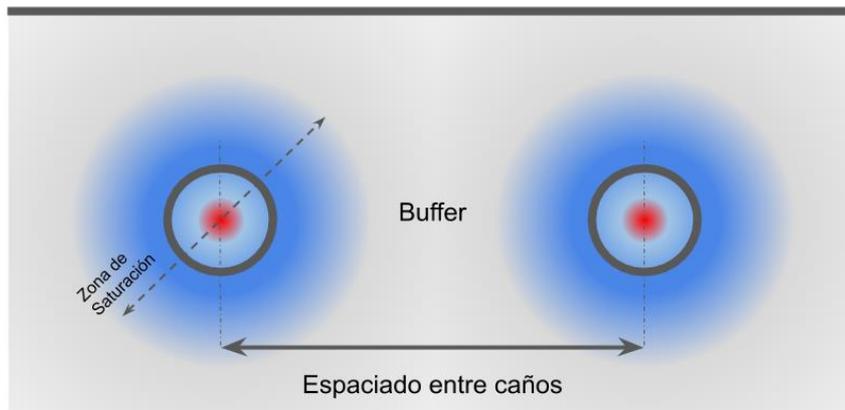
Diámetro del ducto

En un sistema ICTA el diámetro del ducto es un parámetro geométrico que influye de manera importante en el rendimiento. Al aumentar el diámetro del ducto se reduce el coeficiente de convección de la transferencia de calor. En ductos de sección circular con diámetros pequeños (10 a 20 cm) el coeficiente de convección es mayor y por ende hay una mayor reducción de temperatura en verano, pero así también el caudal es menor y se necesita mayor potencia de ventilación. Se puede decir que la longitud del ducto necesario para enfriar o calentar aumenta con el diámetro del mismo. Los diámetros pequeños no solo aumentan la transferencia de calor por convección, sino que la aceleran.

Separación entre ductos

En un sistema intercambiador de calor tierra-aire el espaciado de los ductos subterráneos debe ser suficiente para que cada ducto sea térmicamente independiente (Thevenard, 2007). La distancia debe ser mayor a la zona de influencia térmica del sistema para evitar una disminución del intercambio de calor por saturación térmica del suelo. La zona de influencia térmica se define como la región del suelo alrededor del ducto donde la transferencia de calor aire-tierra causa un cambio apreciable de temperatura en las capas de suelo (ver Ilustración 10). Varios estudios sugieren una distancia óptima de 1 m entre ductos para generar una zona de 'buffer' o colchón térmico y así evitar la interacción térmica entre los ductos (Liu et al, 2017). Dicho de otra forma, la reducción de distancia entre ductos hace que la influencia térmica de un ducto subterráneo sobre otro aumente, produciendo un impacto negativo en el desempeño del sistema intercambiador de calor tierra-aire (Agrawal, 2018).

Ilustración 10: Espaciado entre ductos y zona de saturación

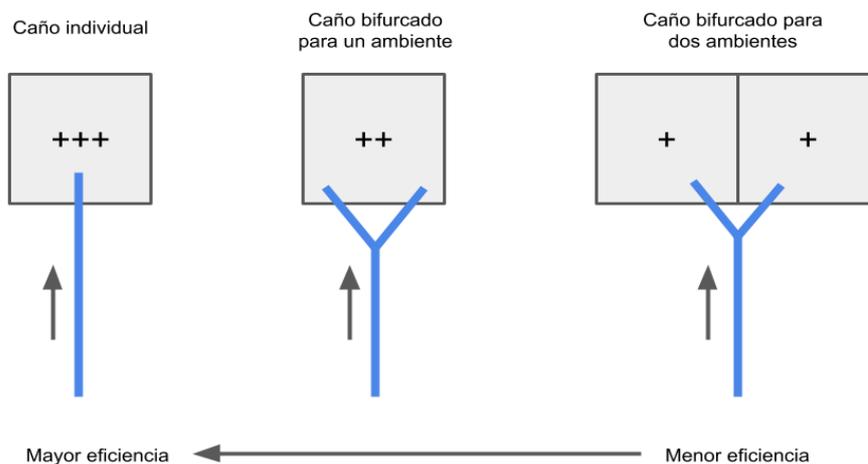


Fuente: Elaboración propia

Cantidad de ductos

Para determinar la cantidad de tubos hay que definir la cantidad de espacios a climatizar. Grandes requerimientos de calefacción o refrigeración podrían necesitar la instalación de varios ductos. Otra situación donde se recomienda la configuración de ductos múltiples es en espacios urbanos donde la superficie disponible para el desarrollo de los ductos es limitada. (Agrawal, 2018). Aunque es posible alimentar más de un ambiente con un mismo ducto para generar economía, no es favorable para el desempeño del sistema (ver Ilustración 11).

Ilustración 11: Ductos por ambiente

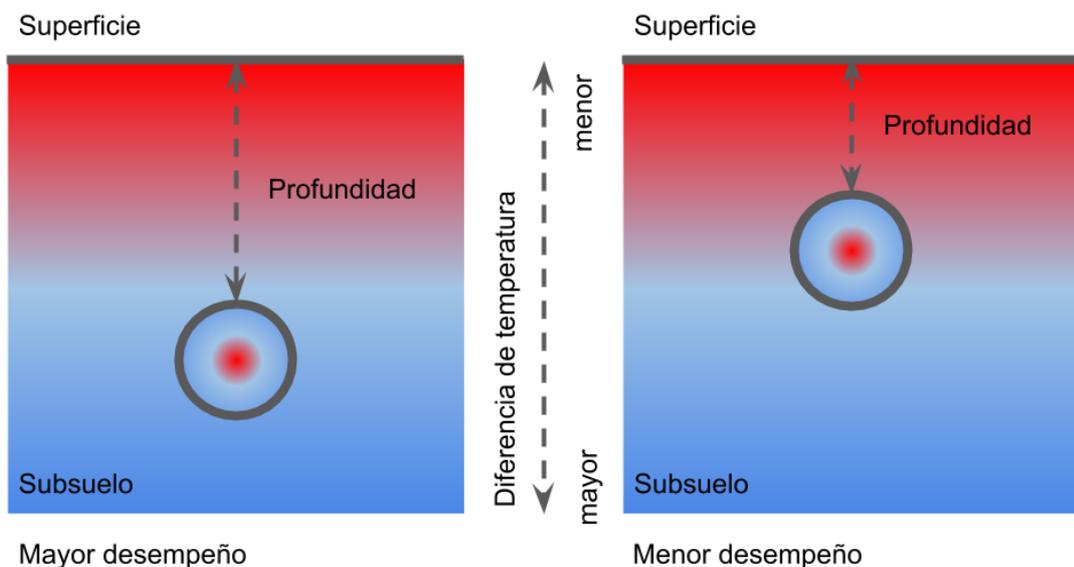


Fuente: Elaboración propia

Nivel de profundidad del ducto

El perfil del geotécnico del suelo es un factor influyente en el diseño del sistema ICTA. La distribución de la temperatura del suelo está determinada por sus propiedades físicas, su estructura y la cobertura del suelo a nivel de la superficie. La temperatura del suelo varía en el tiempo de acuerdo con la hora del día, la estación y la profundidad. La amplitud de variación de temperatura disminuye con el aumento de la profundidad. A cierta profundidad (2 a 4 metros o más de acuerdo con la latitud) la temperatura permanece constante. Esta es la profundidad sugerida para un sistema ICTA. Con el aumento en la profundidad del ducto, el potencial de calentamiento y enfriamiento del sistema ICTA también aumenta, pero solo hasta cierta profundidad, más allá de la cual no ocurre un incremento de rendimiento perceptible. Al momento de determinar la profundidad del ducto no sólo hay que tener en cuenta el rendimiento sino el factor económico. Una profundidad de 2 a 3 metros suele ser un buen balance entre costos de excavación y desempeño, pero esto depende de las condiciones geográficas, climáticas y las condiciones propias del suelo. Una excavación muy profunda no hace diferencia apreciable en la temperatura del suelo. (Agrawal, 2018)

Ilustración 12: Incidencia de la profundidad del sistema



Fuente: Elaboración propia

Flujo de aire dentro del ducto y ventilación de los ambientes

El aumento de velocidad del aire que circula en los ductos enterrados influye sobre el desempeño del sistema ICTA. En velocidades menores (0.5 m/s a 2 m/s), la tasa de caída de temperatura es mayor, debido a que el aire tiene más tiempo de contacto con el ducto, aumentando así la transferencia de calor. La velocidad del aire también influye en el punto de condensación dentro del ducto. Las velocidades más altas reducen la caída de temperatura y el coeficiente de rendimiento del sistema por incremento del consumo energético del soplador (Agrawal, 2018). Por lo tanto, el flujo del aire debe ser lo suficientemente lento para que el intercambio de calor entre tierra y aire sea óptimo.

Para el buen funcionamiento del sistema y una convección ideal es importante que solo exista una salida de aire, de manera que el aire pueda escapar y generar una diferencia de presión suficiente para succionar el aire frío proveniente de los tubos enterrados. Si existen muchas ventanas abiertas, ocurre una ventilación cruzada que atrae al aire caliente del exterior y los ambientes permanecerán a la misma temperatura que el aire exterior. Es importante que esta única abertura que genera la presión negativa del sistema se encuentre en la cota más alta del edificio (Buydens, 2016).

La dificultad para cumplir las condiciones anteriores hace que la ventilación forzada mediante un ventilador axial ubicado en la entrada del sistema sea la manera más efectiva de asegurar un flujo constante de aire al interior, asegurando también la renovación, calidad del aire y el control de operación.

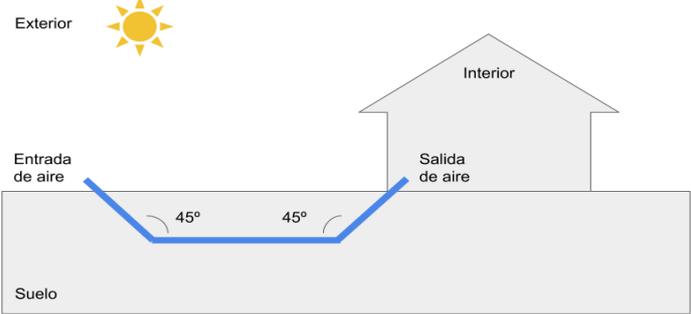
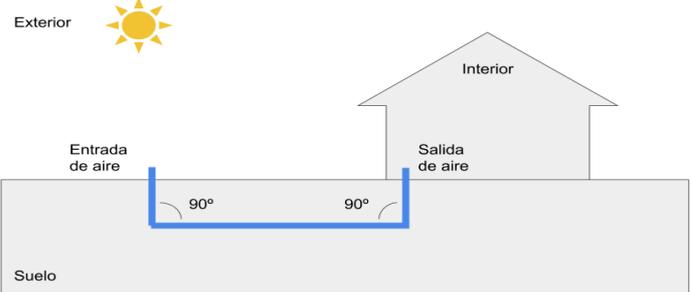
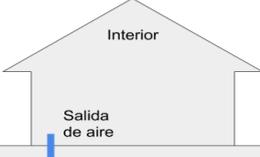
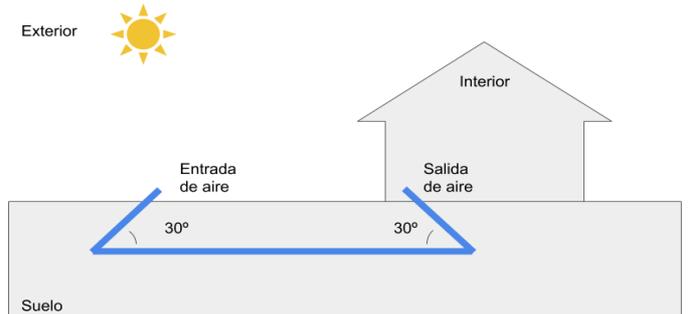
Pendiente de inclinación y ángulos de los ductos

Es indispensable que el tubo tenga una pendiente del 0.5% al 1% hacia un punto de colección para que el agua, producto de la condensación o las filtraciones del suelo, escurra y pueda ser removida posteriormente o bien integrada al terreno natural mediante camas de filtración.

Cualquier esquema que impida la fácil y rápida circulación natural del aire debido a la utilización de codos, ángulos agudos o

ramificaciones innecesarias restará eficiencia al sistema (ver Cuadro 13). Mientras más sencillos los tramos, más eficiente el sistema. (Buydens, 2016)

Cuadro 13: Ángulos y resistencia al flujo de aire

Tipo de unión	Resistencia	Esquema
Ángulo obtuso	Menor resistencia al flujo de aire	 <p>Exterior </p> <p>Interior </p> <p>Entrada de aire  45° 45°  Salida de aire</p> <p>Suelo</p>
Ángulo recto	Mediana resistencia al flujo de aire	 <p>Exterior </p> <p>Interior </p> <p>Entrada de aire  90° 90°  Salida de aire</p> <p>Suelo</p>
Angulo grave	Mayor resistencia al flujo de aire	 <p>Exterior </p> <p>Interior </p> <p>Entrada de aire  30° 30°  Salida de aire</p> <p>Suelo</p>

Fuente: Elaboración propia

Humedad del suelo y la conductividad térmica de los ductos

La humedad del suelo influye en la conductividad y difusividad y es responsable de grandes variaciones en la manera que el calor fluye a través del suelo. La proximidad de los ductos a un cuerpo de agua natural o artificial,

o napa freática, mejora el desempeño del sistema. Así también, el riego de la superficie puede aportar a la eficiencia del sistema, como se estudió en la sección de estrategias de control de temperatura del suelo.

Control de operación del sistema ICTA

El rendimiento del sistema ICTA depende también de su tiempo de operación. Debido al funcionamiento continuo del sistema, el suelo próximo a los ductos del ICTA se satura térmicamente, necesitando un periodo de tiempo para recobrar su condición térmica original lo que resulta en una disminución de la tasa de transferencia de calor entre el suelo y el aire. El tiempo de recuperación térmica en un sistema de ventilación forzada en operación continua puede llevar semanas. Un sistema de operación intermitente, donde existe un tiempo de recuperación térmica del suelo, tiene mejor rendimiento que un sistema de operación continua. La operación se puede controlar encendiendo, apagando o regulando el funcionamiento de un ventilador axial de forma manual o programada, o tapando las salidas de aire mediante rejillas especiales.

1.2.3.3. Diseño y cálculo del sistema ICTA

La transferencia de calor en un sistema ICTA depende de tres procesos:

- Transferencia de calor vía convección entre el aire que fluye a través del ducto enterrado y la superficie interior del ducto
- Transferencia de calor vía conducción entre la superficie interior y la superficie exterior del ducto
- Transferencia de calor vía conducción entre la superficie exterior del ducto enterrado y el suelo circundante

Teniendo en cuenta estas relaciones se puede afirmar que el desempeño de un sistema ICTA depende de las propiedades térmicas del suelo, las propiedades térmicas y de flujo del aire, las propiedades geométricas y físicas del ducto enterrado.

Existen diversas opciones de software y modelos matemáticos para determinar el desempeño de un sistema ICTA (ver Cuadro 14), calculando la

resistencia térmica en cada proceso, el coeficiente de transferencia de calor, la efectividad del ICTA, la temperatura de salida, el potencial de enfriamiento o calentamiento y el coeficiente de desempeño.

Calcular el desempeño térmico de un intercambiador de calor tierra-aire es un problema complejo. Se consideran las diversas variables que intervienen en el funcionamiento del sistema y sus interacciones.

Las herramientas utilizadas para el análisis y el cálculo del desempeño de un sistema ICTA pueden ser:

- Herramientas Simplificadas: Son herramientas diseñadas para calcular el aire de salida del sistema. Comúnmente hojas de cálculo y algoritmos.
- Herramientas Detalladas: Son metodologías de simulación más complejas que resuelven simultáneamente las ecuaciones de transferencia de calor para el aire, el ducto y el suelo. Normalmente asociadas a software especializado de modelado energético.

Cuadro 14: Herramientas de cálculo del sistema ICTA

Algoritmos	• Schiller (1982)
	• Santamouris (1986)
	• Rodriguez et al. (1988)
	• Levit (1989)
	• Seroa et Al (1985)
	• Elmer y Schiller (1981)
	• Sodha et al. (1984)
	• Chen et al. (1983)
Software	• TRNSYS
	• GAEA
	• EnergyPlus
	• OpenStudio
	• Design Builder
	• EcoDesigner Star
	• Matlab
• ANSYS Fluent	
Hojas de cálculo	• Simple Design Tools for Earth-Air Heat Exchangers, Muehleisen (2012)

Fuente: Elaboracion propia

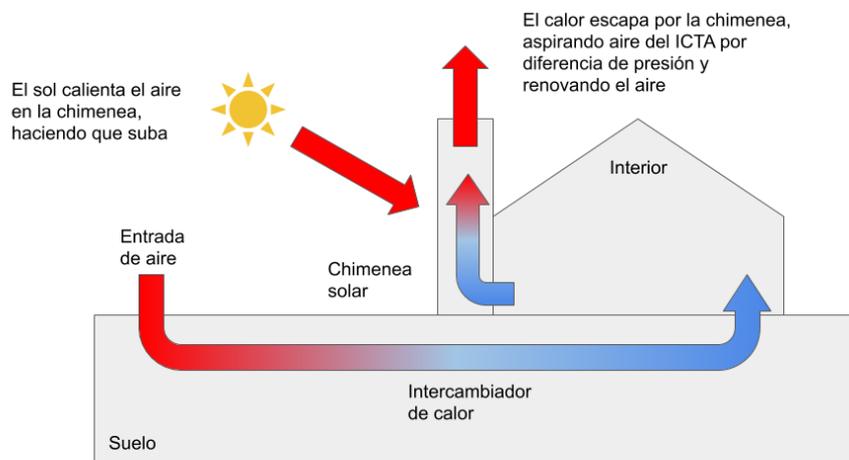
1.2.3.4. Estrategias complementarias para mejorar el rendimiento del sistema ICTA

Existen varias estrategias de climatización complementarias que pueden ser utilizadas en conjunto con los sistemas intercambiadores de calor tierra-aire: chimeneas solares, estructuras con alta capacidad o inercia térmica, ventanas correctamente orientadas para promover la ventilación natural durante las noches de verano para enfriar el edificio, superficies exteriores con recubrimientos reflectivos y elementos que generen sombras apropiadas en ventanas para restringir las ganancias de calor solar durante el verano. El aprovechamiento de árboles y arbustos que moderen el calor a través de la evaporación de las hojas, radiación nocturna, etc. Incluso pueden utilizarse sistemas convencionales.

➤ Chimeneas Solares

Las chimeneas solares pueden contribuir con la circulación pasiva de aire, mejorando la eficiencia del sistema en lugares donde la radiación solar es alta durante todo el año (Correia da Silva, 2007). En un sistema de ventilación mediante chimenea solar, el sol calienta el aire dentro de un ducto, causando que el aire escape por la chimenea y permitiendo el ingreso de aire a la entrada del ICTA por diferencia de presión (ver Ilustración 13).

Ilustración 13: Esquema de funcionamiento de una chimenea solar



Chimenea solar en combinación con un sistema intercambiador de calor tierra-aire

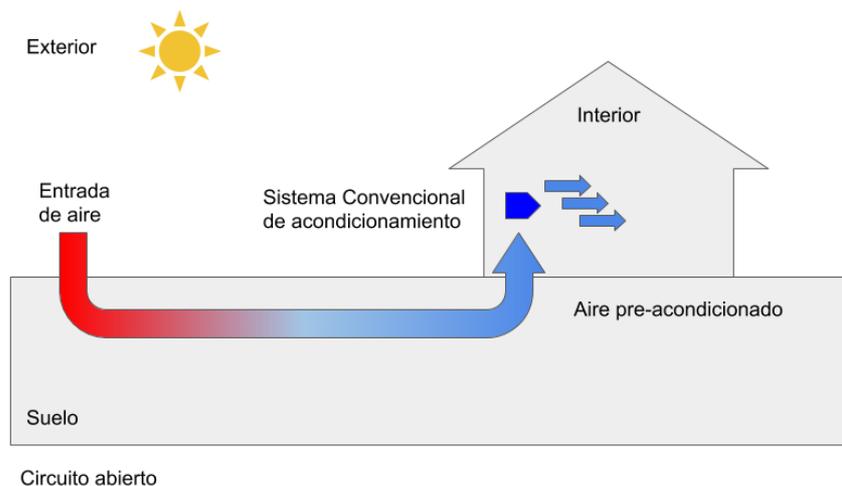
Fuente: Elaboración propia

En esta combinación, la chimenea solar actúa como elemento de ventilación natural y circulación de aire, creando una diferencia de presión y forzando la renovación del aire en el interior del edificio por medio de la succión de aire a través de los ductos subterráneos.

➤ **Sistemas convencionales de aire acondicionado tipo split**

Los sistemas convencionales pueden ser utilizados en conjunto con los sistemas intercambiadores de calor tierra-aire. Bajo este esquema, el sistema ICTA pre-acondiciona el aire que ingresa al sistema convencional de acondicionamiento, generando una mayor desempeño y eficiencia energética.

Ilustración 14: Combinación de un sistema convencional con un sistema ICTA



Fuente: elaboración propia

➤ **Sistemas de Aislación Térmica**

La aislación térmica es fundamental para la optimización del rendimiento del sistema ICTA. Una correcta aislación mantiene estables las temperaturas obtenidas mediante el sistema, mejorando sustancialmente su eficiencia.

➤ **Aprovechamiento de la Inercia Térmica**

La utilización de materiales de alta inercia térmica como ladrillos y piedra, ayudan al funcionamiento de los ductos subterráneos, actuando como disipadores de calor y reguladores de la temperatura interior. Estas superficies de masa térmica pueden incorporarse al diseño forma de muros interiores y actúan de la misma forma que actúa el suelo en relación con los tubos subterráneos. Para que funcionen, es necesario que estas superficies estén aisladas de la radiación solar, de lo contrario almacenarán calor.

➤ **Enfriamiento del suelo**

Considerando el efecto de la temperatura del suelo sobre el desempeño del sistema ICTA, es razonable considerar disminuir la temperatura del suelo por debajo de su temperatura natural característica. Para esto, se debe eliminar el calentamiento del suelo a causa del sol y permitir el enfriamiento por evaporación en la superficie del suelo. Una vez que baja la temperatura de la superficie del suelo, su temperatura promedio anual y las temperaturas de las capas más profundas también disminuyen. (Giovini, 1991)

El sombreado o protección solar, irrigación, humectación o tratamientos superficiales (pinturas, gravilla, etc.) de la superficie del suelo mejorará su habilidad de enfriamiento. En zonas de alta demanda de enfriamiento, la temperatura del suelo cercana al ducto puede afectar al sistema y reducir su desempeño. Esto puede ser mitigado utilizando medios suplementarios de disipación de calor (Samuel, 2013)

1.2.3.5. Productos Comerciales

El mercado no es ajeno a los beneficios de los sistemas ICTA. Existen productos comerciales que ofrecen diferentes sistemas de acondicionamiento basados en el intercambio de calor tierra-aire.

Awadukt Thermo desarrollado por Rehau (Gales, Reino Unido) es un sistema comercial de ductos subterráneos (ver Ilustración 15). La empresa ofrece una línea para uso doméstico y otra para uso comercial. El sistema requiere una longitud mínima de 40 metros para un desempeño óptimo. El

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

desarrollo puede ser lineal, en anillo alrededor de la vivienda o con un trazado sinuoso. La empresa ofrece paquetes distintos para viviendas, con características especiales según las necesidades de ventilación.

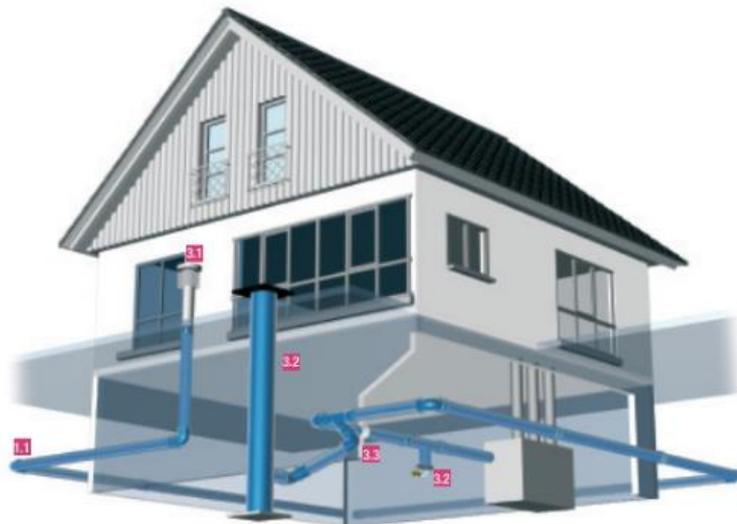
Ilustración 15: Sistema comercial Awadukt Thermo



1.1 AWADUKT Thermo-Pipe System
 - Antimicrobial Lining for hygienic fresh air-
 Optimised PP - solid wall pipe with improved hot transfer ability

- High longitudinal rigidity so condensation is safely discharged

- Radon Proof Through a special safety lock seal system.



1.1 Air Inlet
 with coarse or fine filter for hygienic air supply

1.2 Condensation discharge
 for buildings without cellars, condensation is pumped via a collection shaft

for buildings with cellars the condensation can be discharged through the drain

1.3 Wall Penetration
 for the correct installation of the pipe through the exterior wall into the building



Fuente: Catálogo Awadukt Thermo, 2019

Existen diversos parámetros que afectan el desempeño de un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Conocer cada uno de ellos, cómo influyen y la manera en que interactúan entre sí es esencial para diseñar un sistema efectivo de climatización pasiva.

En Paraguay existen casos de aplicación con una variedad de enfoques. En el siguiente capítulo se analizan 3 casos particulares de sistemas intercambiadores de calor tierra-aire aplicados a la arquitectura como método de climatización pasiva.

CAPÍTULO II: CASOS DE APLICACIÓN DE CLIMATIZACIÓN PASIVA POR MEDIO DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS EN PARAGUAY

Una vez comprendido el funcionamiento del sistema intercambiador de calor tierra-aire, e identificados sus componentes de diseño y los factores que inciden en la eficiencia, podemos relevar los casos de aplicación local para ser analizados de manera objetiva y sistemática.

Antes del análisis de los casos de aplicación en Paraguay, investigamos sobre el contexto local.

2.1. Contexto local

El auge mundial de la arquitectura sostenible contemporánea tiene eco en Paraguay, dando lugar a experiencias locales de climatización pasiva que buscan aminorar el impacto que tiene de la industria de la construcción sobre el medio ambiente. Existen diversos agentes responsables de estas adopciones: profesionales, empresas privadas, organizaciones e instituciones. A continuación, se elabora sobre el rol de cada uno de ellos.

2.1.1. Factores Climáticos en Paraguay

Son varios los factores que inciden en las características de un determinado clima: temperatura, humedad, radiación solar y ubicación geográfica. Los que más incidencia tienen en nuestra región son la radiación solar, la temperatura, los vientos y la humedad relativa.

En el Paraguay predomina el clima subtropical. Esta zona se caracteriza por temperaturas elevadas a lo largo del año, cambios climáticos bruscos y precipitaciones abundantes.

Las temperaturas medias más frescas se encuentran en Amambay y Mbaracayú mientras que las más calurosas se ubican en la zona del Chaco.

Los vientos del norte provenientes del Brasil son cálidos y húmedos mientras que los vientos del sur que soplan desde la Antártida y pasan por Argentina son fuertes y secos, pudiendo superar los 50 km/h.

Existe un contraste de humedad relativa entre las Región Oriental, donde llega a casi el 80% y la Región Occidental donde la media anual es del 55%. (Paredes, 2017)

Entender los factores climáticos de un sitio o region es fundamental a la hora de plantear tecnologías alternativas para el acondicionamiento térmico y el confort humano en edificios.

2.1.2. Los profesionales independientes, sector privado y organizaciones

En Paraguay, además de los esfuerzos de difundir e implementar tecnologías alternativas de profesionales independientes pertenecientes al rubro de la construcción como los arquitectos Silvio Ríos, Emma Gill, José Cubilla, Yago Enriquez, Mauricio Remonato y las ingenieras Gabriela Mezquita, Delia Cohenca, existe desde el noviembre del 2012 el Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible, organización sin fines de lucro, miembro del World Green Building Council, cuyo principal objetivo es la promoción de la integración de tecnologías sostenibles, incluidos los intercambiadores de calor tierra-aire, en la industria de la construcción, impulsando la creación de normas y reglamentaciones para la construcción sostenible a través de alianzas estratégicas con instituciones gubernamentales, académicas y empresas privadas.

2.1.2.1 El Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible

El Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible (CPYCS) o Paraguay Green Building Council (PYGBC) se fundó con el fin de facilitar y promover el diseño y la construcción sostenible a través de la promoción de y facilitación de técnicas y herramientas disponibles para el desarrollo de proyectos sostenibles, actuando como un agente de integración de los actores involucrados en este sector.

Las actividades que promueve el Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible son:

- Promover la integración de tecnologías sostenibles dentro de la industria

- Generar programas educativos y de capacitación a los diferentes actores involucrados
- Promocionar las empresas que brinden productos y servicios sostenibles
- Impulsar la creación participativa de normas, reglamentaciones y estándares nacionales para la construcción sostenible
- Incentivar la aplicación de los criterios de sostenibilidad en todos los estamentos sociales, públicos y privados
- Generar alianzas estratégicas que beneficien al Consejo y a la Sociedad Paraguaya,
- Acompañar el proceso para la obtención de las certificaciones internacionales y custodiar los procesos de desarrollo sostenible a nivel nacional.

Como parte del Eje de Gestión, el CPYCS y a través del Convenio Marco de Cooperación de descentralización de Comités Técnicos con el Instituto Nacional de Tecnología y Metrología (INTN) ha conformado el Comité Técnico de Normalización CTN 55 “Construcción Sostenible”.

Hasta la fecha, la Normativa Paraguaya de Construcción Sostenible fue desarrollada como un conjunto, considerando 5 enfoques o áreas de desarrollo, que son: Sitio y Arquitectura; Recursos Materiales; Energía y Atmósfera; Eficiencia en Agua; Calidad Ambiental Interior.

En conjunto, las Normativas abarcan todas las áreas donde deben tomarse las consideraciones necesarias para lograr diseños y construcciones eficientes en el uso de nuestros recursos naturales, de tal forma a proteger futuras generaciones las vastas riquezas naturales del Paraguay.

La aplicación efectiva de éstas y las futuras Normativas de Construcción Sostenible buscan lograr beneficios concretos ambientales como económicos y de salud y bienestar mediante la construcción de Edificaciones Sostenibles. (Gabriela Mezquita Larán, presidente CPYCS, CTN 55 “Construcción Sostenible”)

2.1.3. El INTN y las Normas Paraguayas de Construcción Sostenible

El Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) como Organismo Nacional de Normalización promueve y adopta las acciones para coordinar la elaboración de las Normas Paraguayas. Su actividad se desarrolla mediante la conformación de Comités Técnicos de Normalización (CTN) que trabajan en campos de acción claramente definidos. Así es como en el año 2015 fueron desarrolladas las Normas Paraguayas de Construcción Sostenible.

Las normativas elaboradas por el comité abarcan todos los aspectos relevantes donde deban tomarse las consideraciones necesarias para lograr que el diseño y el proceso constructivo de edificios sean eficientes en el uso de los recursos naturales (ver Cuadro 15). Estas normas buscan reducir el consumo de energía, las emisiones de CO₂, el uso del agua y los residuos sólidos.

Cuadro 15: Normas paraguayas de Construcción Sostenible

NP 55 001 14 - Sitio y Arquitectura	La elección del sitio, proximidad al transporte público, los efectos de la isla de calor, la contaminación lumínica, la protección de áreas verdes, prevención de la contaminación durante la construcción, colección de aguas pluviales y políticas para la promoción del uso de medios de transporte alternativos.
NP 55 002 15 - Recursos Materiales	La reutilización de edificios, gestión integral de residuos de construcción, utilización de productos y materiales sostenibles.
NP 55 003 16 - Eficiencia en el Uso del Agua	Reducción del uso de agua potable, reducción del impacto del uso del agua para el riego, recuperación y reutilización de aguas residuales y pluviales.
NP 55 004 16 - Calidad Ambiental Interior	Toxicidad de los materiales de acabado interior, la gestión de calidad del aire durante el proceso de la construcción, control de fuentes contaminantes interiores, ventilación e iluminación natural, deslumbramiento en áreas de ocupación y mantenimiento de artefactos de iluminación.
NP 55 005 16 - Energía y Atmósfera.	Emisión de sustancias que afectan la capa de ozono, parámetros de diseño pasivo, análisis de demanda y eficiencia energética, producción de energías renovables e innovación.

Fuente: INTN

El sistema ICTA se encuentra en el marco de las normas INTN de Construcción Sostenible referentes a los recursos materiales, la calidad ambiental interior, utilización de energías renovables y protección del medioambiente.

2.1.4. Incentivos Municipales y Ordenanzas

Basándose en las Normas Paraguayas de Construcción Sostenible, y mediante la gestión del Consejo Paraguayo de Construcción Sostenible, el Municipio de Asunción crea la Ordenanza N° 128/17 “Que regula y establece normas sobre construcción sostenible para la ciudad de Asunción como los incentivos para impulsar este tipo de construcciones en la ciudad”.

La ordenanza, en vigencia desde el año 2017, busca promover la construcción sostenible en Asunción mediante incentivos impositivos, con una reducción importante de impuestos a la construcción para aquellos proyectos considerados sostenibles por el comité de evaluación.

Naturalmente, el sistema ICTA cumple con varios de los puntos requeridos por la ordenanza para clasificar al edificio como sostenible, facilitando la obtención de beneficios impositivos.

2.2. Aplicación de Ductos Subterráneos en Paraguay

Para esta investigación se identificaron proyectos y construcciones a nivel nacional consultando publicaciones científicas, realizando entrevistas a profesionales locales y asociaciones especializadas involucradas en proyectos donde fueron aplicados ductos subterráneos para la climatización de espacios. Durante la búsqueda se hallaron diversas experiencias, proyectos y construcciones en una variedad de estados. A través de entrevistas, arquitectos e ingenieros, en carácter de diseñadores, constructores y consultores compartieron sus experiencias en el diseño y construcción de un sistema intercambiador de calor tierra-aire en Paraguay.

Para la obtención y procesamiento de los datos de cada referente local primeramente se identificaron todas las características relevantes de un sistema intercambiador de calor tierra-aire, aquellas que inciden en su desempeño, para luego elaborar un formulario único de relevamiento. El formulario se encuentra en los Anexos.

Cada uno de los sistemas relevados presenta un abordaje distinto, con características únicas.

2.2.1. Caso 1: Prototipo Vivienda Sostenible, Asunción

El Prototipo de Vivienda Sostenible es una construcción residencial nueva realizada por el Consejo de Construcción Sostenible (Green Building Council, Paraguay) para la exposición de diseño y arquitectura CasaCor realizada en Asunción en el año 2017.

La vivienda prototipo se construyó al lado de una construcción existente en un terreno privado ubicado en la Avenida Mariscal López casi Avenida Brasilia, en el barrio Mariscal López de la ciudad capital de Asunción, Paraguay. Tiempo después, al culminar la exposición para la cual fue construida, la vivienda prototipo fue desmontada y hoy en día solo quedan registros fotográficos, planos, mediciones experimentales y documentaciones de cálculo.

El prototipo de vivienda tenía 38 metros cuadrados de superficie y fue construida en base a los requerimientos de las Normas Paraguayas de Construcción Sostenible. La casa contó con diversos aliados comerciales del rubro de la construcción y tenía como fin demostrar la aplicación de diversos sistemas de construcción sostenible y energéticamente eficientes, promocionando tecnologías alternativas para la construcción de viviendas. En cuanto a acondicionamiento de aire, la construcción empleó varias estrategias y tecnologías como doble techo, techo verde, aislación térmica y muros verdes (ver Ilustración 16).

Entre las tecnologías utilizadas, destacamos la implementación de un sistema de acondicionamiento del tipo intercambiador de calor tierra-aire para el espacio principal.

El sistema fue diseñado con el apoyo de la herramienta de modelado energético Design Builder. Para el análisis no se realizó un estudio de suelo in situ, en cambio se consideraron los datos de temperatura de suelo obtenidos por la ingeniera Delia Cohenca en su trabajo de investigación experimental “Caracterización de las Propiedades Térmicas del Suelo” (Cohenca, 2013) que trata sobre temperaturas subterráneas en la ciudad de San Lorenzo.

Ilustración 16: Vistas de la Vivienda Prototipo, Caso 1



Vista exterior del Proptotipo de Vivienda Sostenible para la exposición CasaCor, Asunción, 2007

Fuente: Paraguay Green Buiding Council



Fue construída una estructura de doble techo verde y aislación de muros fueron utilizados como sistemas complementarios de climatización pasiva.

Fuente: Ing. Gabriela Mezquita

La excavación de la zanja para la colocación de los ductos tenía una profundidad máxima de 2,50 metros de altura y fue realizada mediante una retroexcavadora. Se utilizó el mismo suelo extraído de la excavación como material de relleno de las zanjas, compactando el material alrededor de los

ductos enterrados a medida que se realizaba el relleno. La superficie de terreno bajo la cual se construyeron los ductos subterráneos se encontraba cubierta de vegetación como una estrategia de control de temperatura y humedad del suelo para el mejoramiento del rendimiento del ICTA.

Como método de ventilación se instaló un ventilador mecánico de 0,75 HP a la entrada del sistema. La entrada de aire, junto con el ventilador mecánico, se encontraban ubicados a varios metros de la vivienda, próximos a una construcción vecina. Durante las mediciones, no se registró el flujo de aire proveído por el ventilador, pero comprobó que su potencia era suficiente para mover el aire exterior al interior de la vivienda prototipo. Como medida adicional, la ventilación estaba complementada por un acondicionador de aire split. Este sistema de acondicionamiento combinado aumentaba el desempeño de ambas tecnologías.

Para la construcción de los ductos se utilizaron caños de PVC lisos de color marrón enterrados a una profundidad de 2,50 metros (ver Ilustración 17). El intercambiador de calor tierra-aire contaba con un único caño de PVC de 200 mm con un desarrollo horizontal total de 113 metros de longitud. El trazado lineal de los ductos partía de un extremo y recorría cierta distancia para luego cambiar de dirección y retornar por la misma fosa como estrategia de diseño para ganar mayor desarrollo, optimizando área de excavación y aprovechando una misma zanja dos veces.

La separación entre ambos tramos paralelos era de 80 centímetros en el eje horizontal. Esta separación permitía la independencia térmica de cada ducto. El segmento de entrada y el segmento de salida, al igual que los segmentos donde ocurrían cambios de dirección, tenían un ángulo de inclinación de 90 grados con respecto, lo cual aumentaba la resistencia del flujo de aire. La circulación del aire se daba a través de un circuito abierto horizontal, permitiendo la renovación de aire interior.

Ilustración 17: Proceso constructivo del Caso 1



Medición de la profundidad de la zanja realizada con retroexcavadora. La cinta métrica marca 220 cm

Fuente: Ing. Gabriela Mezquita



Luego de excavar el terreno hasta una profundidad promedio de 220 cm los ductos de aire fueron construidos y ensamblados in situ con caños de PVC.

Fuente: Ing. Gabriela Mezquita



Para los puntos de entrada y salida del sistema se reutilizaron los registros pluviales existentes en el sitio.

Fuente: Ing. Gabriela Mezquita

En su salida, situada en el interior de la vivienda prototipo, se construyó un muro hueco divisorio en cuya base se ubicaron las rejillas difusoras que

proveían el aire del sistema en dos direcciones, sirviendo a dos espacios de la casa: la cocina con un caudal menor, regulado por una salida de menor superficie y el living comedor, con un caudal mayor, regulado por una salida de mayor superficie.

El sistema poseía un control de operación que permitía la activación y desactivación manual del ventilador, de acuerdo con la necesidad de uso. No contaba con un sistema de automatización o un sensor dedicado. Sin embargo, la casa contaba con sensores de temperatura en varios puntos.

Se realizó un análisis de costos y se determinó que la mayor parte de la inversión se encontraba en la excavación de la fosa. El costo de funcionamiento era igual al costo de operación del ventilador. Como costo de mantenimiento se identificó el cambio mensual o bimestral del filtro de aire instalado a la entrada del sistema donde se encontraba ubicado el ventilador.

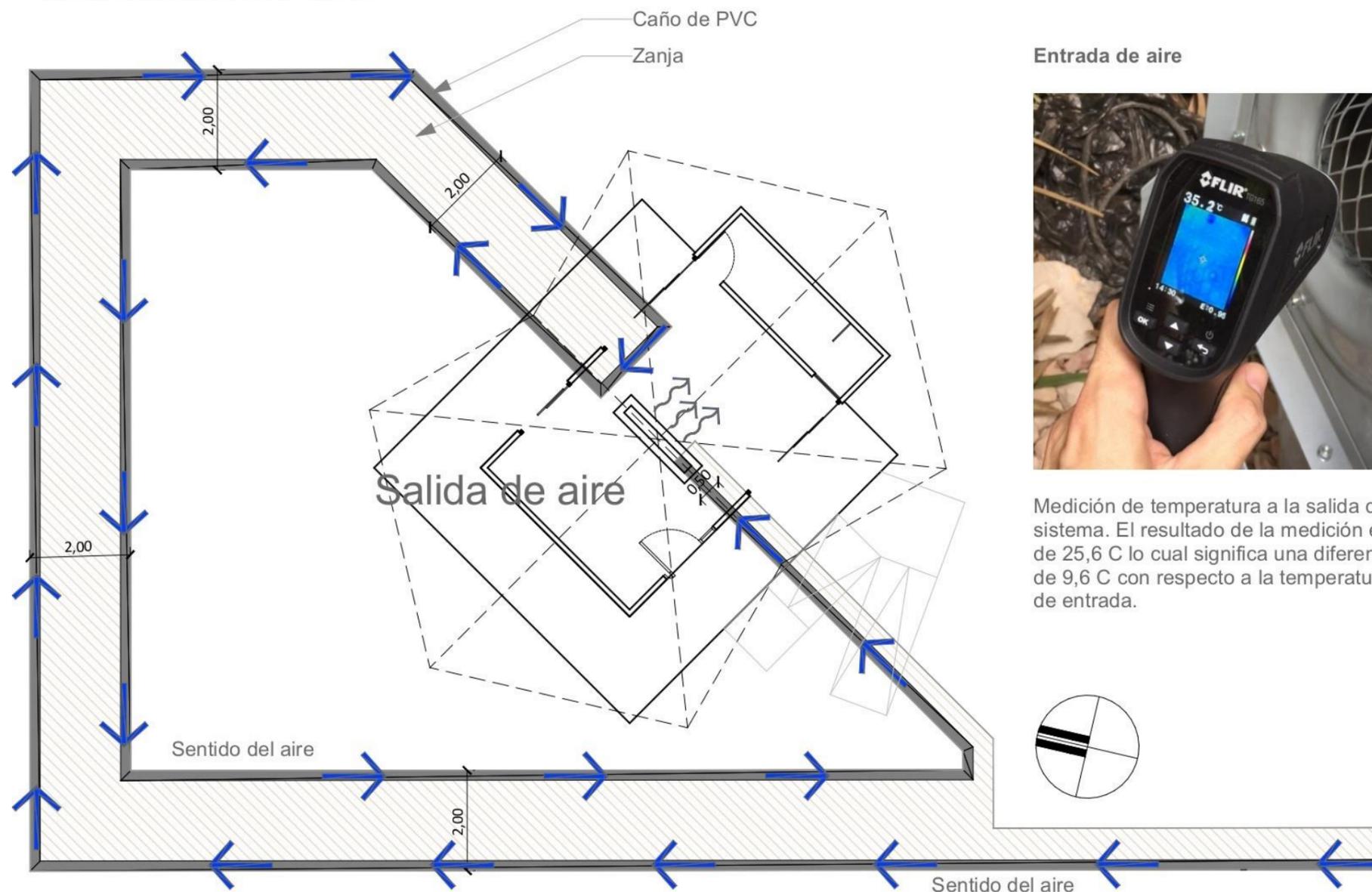
Se consideró una pendiente en el desarrollo de los caños. Fue construido un registro de inspección en un sector cercano a la casa y al resguardo de una construcción existente. Este registro con tapa de vidrio transparente tenía como fin permitir a los visitantes de la exposición conocer el sistema. En su tapa se observó la condensación de agua. Como barrera de protección se instaló un filtro comercial a la entrada del sistema y una rejilla a la salida. No se aisló el tramo de ducto ubicado en la salida.

Se realizaron mediciones experimentales durante la exposición de la casa prototipo. Las mediciones fueron registradas mediante una cámara termográfica FLIR TG165, con precisión de 1,5 grados Celsius. Estas mediciones no fueron realizadas a lo largo del tiempo, sino fueron mediciones puntuales durante los días de exposición, a las 14:30 horas, en el mes de octubre del año 2017. La diferencia registrada entre el aire de entrada y salida fue de hasta 10 grados centígrados. Además de las mediciones experimentales se realizaron mediciones analíticas mediante el software de modelado energético Design Builder. Estas mediciones correspondían a las obtenidas durante las mediciones experimentales. Se observa una optimización de la excavación mediante un planteamiento eficiente del recorrido de los ductos.

Ilustración 18: Trazado de los ductos subterráneos y mediciones experimentales, Caso 1

Trazado del sistema intercambiador de calor

El trazado original planteado para el Prototipo de Vivienda Sostenible permite optimizar la excavación y el desarrollo de los caños, utilizando una misma zanja para albergar dos tramos de ductos.



Se observa una optimización de la excavación mediante un planteamiento eficiente del recorrido de los caños.

Fuente: Elaboración propia

Mediciones experimentales

Las mediciones reportadas fueron tomadas con un termómetro infrarrojo FLIR TG165 de uso general. Cabe mencionar que este termómetro mide la temperatura puntual y no de ambiente. Se observa entonces la temperatura de la superficie de los caños en los puntos de entrada y salida, no así la temperatura del aire.

Entrada de aire



Medición de temperatura a la salida del sistema. El resultado de la medición es de 25,6 C lo cual significa una diferencia de 9,6 C con respecto a la temperatura de entrada.

Salida de aire



Medición de temperatura a la entrada del sistema. El termómetro indica una temperatura de ambiente igual a 35,2 C

Observaciones sobre la implementación del ICTA en el Caso 1

Un detalle notable con respecto a los demás casos analizados es que para el diseño del proyecto se utilizaron herramientas de modelado energético con datos locales con el objetivo de dimensionar los componentes, simular condiciones de operación y optimizar el funcionamiento del sistema ICTA durante la etapa de planificación. Este análisis previo permitió determinar la factibilidad técnica del sistema antes de su construcción. Las mediciones analíticas resultantes del modelado energético fueron luego confirmadas mediante mediciones experimentales.

Otra característica importante es que se instaló un ventilador axial a la entrada del sistema que proveía un caudal constante y suficiente al intercambiador de calor tierra-aire, permitiendo el control de operación y ayudando a la renovación de aire en el interior del edificio.

También se destaca la utilización de sistemas de climatización pasivos y activos complementarios como la construcción de un techo verde, muros dobles, galería perimetral, sistemas de aire acondicionado.

Al utilizar una misma zanja para colocar más de un tramo de cañería se obtuvo un ahorro importante de espacio, tiempo y recursos.

Entre los casos locales estudiados, el sistema contaba con la mayor longitud de ductos enterrados, lo que se traduce en una mayor transferencia de calor y eficiencia energética.

Cabe observar que, si bien se realizaron mediciones experimentales para validar el modelo analítico, dichas mediciones fueron puntuales y no largo de un periodo de tiempo por lo que no se puede determinar si el desempeño del sistema permanece constante durante el día.

El sistema podría haber mejorado su funcionalidad si contaba con una estrategia de control u operación automatizada, instalando sensores de temperatura para el monitoreo del sistema y controladores automáticos.

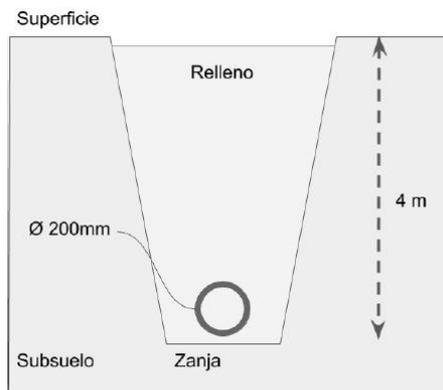
2.2.2. Caso 2: Sala Politécnica, San Lorenzo

En el año 2013 se construyó con fines experimentales un sistema intercambiador tierra-aire para climatizar una sala existente del Centro de

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Datos Meteorológicos de la Facultad Politécnica, en el Campus de la Universidad Nacional de Asunción, ubicada en el kilómetro 11,5 de San Lorenzo. El sistema fue diseñado, implementado y monitoreado por los investigadores Ing. Delia Cohenca, Dr. Mariano Bordas, Ing. David Schvartzman y Lic. Miguel Jara en el marco de una investigación científica.

Ilustración 19: Sala Politécnica, Caso 2



Sección esquemática de la zanja. El caño de 200 mm se sitúa al fondo de una fosa longitudinal de 4 metros de profundidad.

Fuente: Elaboración propia



Un ventilador axial fue instalado en la entrada del sistema, sobre un nicho de mampostería de ladrillos, para forzar la circulación del aire al interior de los ductos.

El ventilador de 175W contaba con un regulador de velocidad para controlar el flujo de aire.

Fuente: Cohenca, 2013

Para la excavación de las zanjas se utilizó una pala retroexcavadora, llegando hasta una profundidad de 4 metros. El ancho de la zanja fue de 1 metro y se extendía 20 metros a lo largo del terreno.

Mediante un análisis laboratorial realizado por el Laboratorio de Servicio al Público del Departamento de Suelo y Ordenamiento Territorial de la Facultad de Ciencias Agrarias, se determinaron la composición, las características y propiedades físicas del suelo. El suelo marrón rojizo, con textura franco-arenosa estaba compuesto de arena (69.36%), arcilla (22.64%) y limo (8.00%) y su conductividad térmica era de 1.058 W/mK.

Para la construcción de los ductos, se utilizaron 3 tubos de PVC de 200 mm unidos en serie y con adhesivo para lograr una longitud total de 18 metros de largo. Esta cañería fue instalada en sentido horizontal en el fondo de la zanja, a 4 metros de profundidad. En sus extremos se colocaron dos codos de 90 grados en dirección vertical, seguidos de 2 caños que, en una combinación de codos y caños cortos, aislados con Isolant TBA (lámina de espuma de polietileno de 5 mm con film aluminizado) para mantener las temperaturas obtenidas, llegaban a la superficie.

Al exterior, un ventilador axial de 200 mm de diámetro, con regulador de velocidad de aire de tres velocidades, 2800 rpm máximos y potencia de 175W fue colocado en la entrada del sistema, captando el aire a temperatura de ambiente. El aire impulsado era conducido hasta una rejilla ubicada en la parte inferior de una pared al interior de la sala a climatizar. El costo aproximado de este ventilador fue de Gs. 700.000.

Cuadro 16: Velocidades del impulsor axial

Nivel de velocidad en la entrada	Velocidad de aire a la salida del intercambiador
Velocidad mínima	1.3 m/s
Velocidad media	1.8 m/s
Velocidad máxima	2.2 m/s

Fuente: Cohenca, (2013)

Se instalaron sensores de temperatura en la entrada y la salida del intercambiador de calor tierra-aire. Las lecturas de ambos sensores se registraron cada 15 minutos, logrando captar los datos de variación diaria y estacional tanto de la temperatura de entrada como la temperatura de salida.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Además de registrar la temperatura de entrada y salida del sistema, de forma paralela e independiente se obtuvieron mediciones de temperatura subterránea a 6 metros de profundidad.

Ilustración 20: Proceso constructivo del Caso 2



Luego de la planificación del trazado de los ductos, se realizó la excavación mecánica de la fosa con una zanjadora. Se realizó un escalonamiento en la excavación para evitar el desmoronamiento del suelo.



Se colocó el sistema de caños, previamente armado, en el fondo de la zanja. Los caños pre ensamblados fueron bajados cuidadosamente a la zanja con la ayuda de cuerdas.



El tramo de cañería con salida a la superficie se aisló para evitar la ganancia de calor en la zona de contacto con la superficie del suelo.

Fuente: Cohenca, (2013)

En dos ocasiones, el 18 y el 20 de noviembre se registró la velocidad del aire a la salida del caño. Las velocidades registradas fueron de 1,3 m/s (baja), 1,8 m/s (media) y 2,2 m/s (alta). Se observa que el caudal en velocidad baja es de 147 m³/h, suficiente para proveer a una sala de 15 x 3 m, 1 renovación de aire por hora.

Según las temperaturas registradas por las micro estaciones, la temperatura exterior máxima durante el periodo comprendido entre enero y agosto del 2013 fue de 33,2 C y se dio en enero, mientras que la temperatura máxima a la salida del intercambiador fue inferior a 25 C en el mismo mes. La temperatura mínima exterior registrada durante el experimento fue 16,0 C y se dio en el mes de mayo. A su vez, la temperatura de salida mínima fue de 20 C y tuvo lugar en marzo. Durante el mismo periodo estudiado, la temperatura subterránea a 6 metros de profundidad permaneció invariable en 23,5 C, coincidiendo con la temperatura media anual.

Las mediciones experimentales demostraron que se logró reducir la temperatura exterior hasta 7 C durante el periodo más caluroso del año y que durante el periodo de mediciones, la temperatura de salida permaneció en el rango de 25 a 20 C, muy cerca de la media anual (23,5 C)

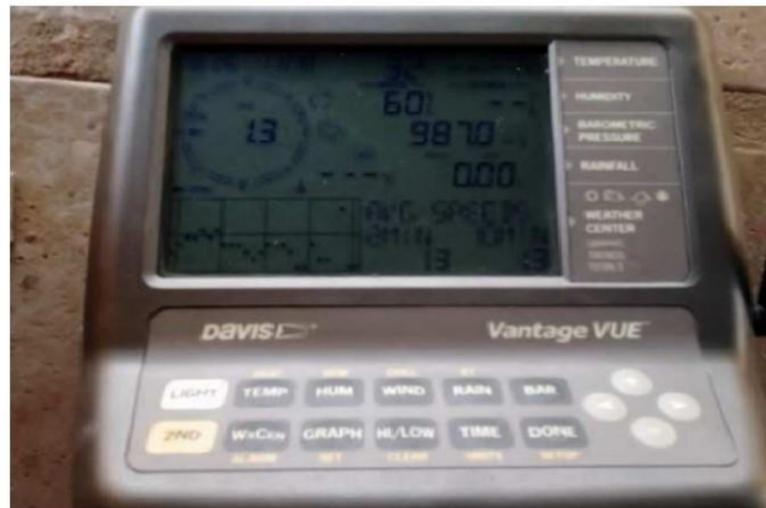
Los gráficos indican una disminución importante en la variación de temperatura durante el día. También se observa que, durante los días de frío, el sistema aporta calor y la temperatura de salida permanece en niveles confortables.

Ilustración 21: Mediciones experimentales del Caso 2

Mediciones experimentales



Se utilizó un instrumento de medición de caudal de aire para relacionar la temperatura de salida y determinar el desempeño del sistema a distintas velocidades.



Se estudió el desempeño a tres velocidades con el objetivo de determinar el caudal óptimo para el intercambio de calor. La medición del flujo promedio para las tres velocidades del ventilador axial fueron 1.3 m/s, 1.8 m/s y 2.2 m/s.



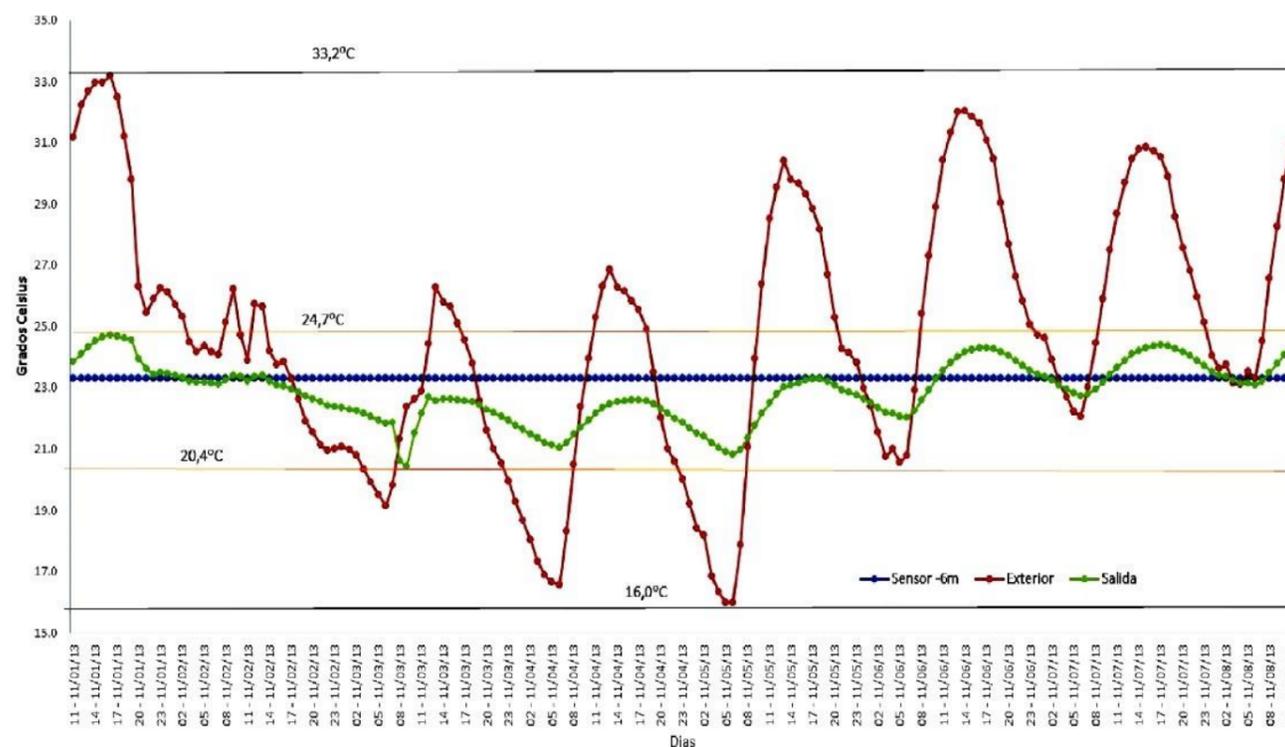
Un termómetro fue instalado dentro del sistema para monitorear la temperatura de aire durante su operación a lo largo de un periodo de tiempo. Otros dos termómetros fueron utilizados para medir la temperatura del suelo y la temperatura de ambiente respectivamente.

Velocidad del impulsor axial instalado en la entrada	Velocidad de aire a la salida del intercambiador
Velocidad mínima	1.3 m/s
Velocidad media	1.8 m/s
Velocidad máxima	2.2 m/s

Componentes del suelo	Descripción
Arena	69.36%
Arcilla	22.64%
Limo	8.00%
Color	Marrón Rojizo
Conductividad Eléctrica	28.8 μ S/cm
Concentración en minerales (sales)	0.18432 dS/m
Concentración en materia orgánica	0.19%
Textura	Franco Arenosa
Conductividad Térmica	1.058 W/mK

Análisis de los componentes del suelo para determinar sus características termofísicas.

Fuente: Cohenca, (2013)



El gráfico compara la variación pronunciada de la temperatura exterior (rojo), comparada con la curva suave de variación de la temperatura del aire de salida del sistema (verde).

La línea azul registra la temperatura constante del suelo.

Observaciones sobre la implementación del ICTA en el Caso 2

Se destaca la instalación de sensores de temperatura para el monitoreo del sistema durante su operación a lo largo del tiempo, además del estudio de los componentes del suelo y sus propiedades termofísicas.

Tal como en el sistema del Caso 1, un ventilador axial instalado en la entrada el sistema proveía un caudal suficiente al intercambiador de calor tierra-aire. El caudal podía ser controlado de forma manual y la velocidad del aire fue monitoreada durante el periodo de operación.

Si bien la longitud de los ductos fue menor a la de los demás casos estudiados, los ductos del sistema poseen la mayor profundidad.

Por último, al igual que los demás casos, el sistema no contaba con una estrategia de control u operación automatizada que le permitiera mejorar su eficiencia.

2.2.3. Caso 3: Vivienda Takuru, Piribebuy

La Vivienda Takuru es una construcción residencial nueva de 350 metros cuadrados realizada en el año 2015-2016 por los arquitectos José Cubilla y Yago García-Enríquez en la ciudad de Piribebuy, Departamento de Cordillera, Paraguay. La casa cuenta con 5 dormitorios y un espacio de living-comedor con cocina integrada. Estos ambientes son servidos por un sistema de pozo canadiense o provenzal implementado durante la construcción de la residencia.

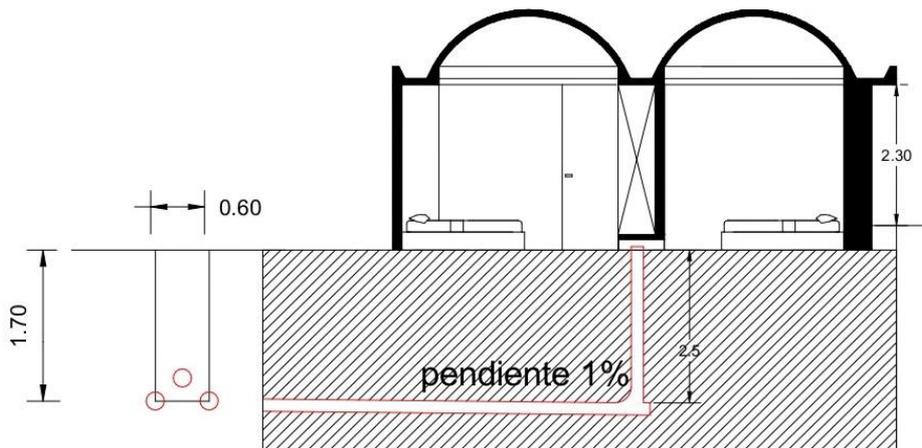
Ilustración 22: Vivienda Takuru, Caso 3



Fachada lateral de la casa Takuru. El muro de suelo cemento protege el pasillo de distribución de los dormitorios. Para el techo se construyeron bóvedas de ladrillos de suelocemento.



Interior del living-comedor. Un patio interior cubierto de vegetación alberga la entrada de los ductos del sistema ICTA. No existe un sistema de impulsión de aire en la entrada.



Corte esquemático de los caños y su disposición en la zanja. Se aprovecha la zanja para colocar los tres caños en forma piramidal para aprovechar el ancho de la excavación.

Fuente: Arq. Yago García-Enriquez

Ilustración 23a: Proceso constructivo del Caso 3



La zanja fue excavada de forma manual hasta una profundidad de 2,50 metros por 1 metro de ancho. Esta zanja pasaba por debajo de la casa, a todo lo largo del área a construir.



Los ductos de aire fueron contruídos con caños cerámicos organizados en distintos circuitos y asentados en el fondo de la zanja, a una profundidad de 2,50 metros y con una pendiente de 1% hacia el sector de registros de desagote.



En los puntos de salida de aire se construyeron unos registros de salida y desagote. Estos puntos estaban ubicados en los ambientes principales de la vivienda: dormitorios y living comedor.

La zanja fue luego rellena compactando el suelo cuidadosamente para no dañar los caños cerámicos.

Fuente: Arq. Yago García-Enriquez

Ilustración 24b: Proceso constructivo del Caso 3

Entrada de aire



Las tres entradas de aire se ubican en un patio interior, ubicado en el centro de la casa. Los caños cerámicos se encuentran cubiertos con una malla para evitar la entrada de insectos y animales. Fuente: Arq. Yago García-Enriquez

Salida de aire

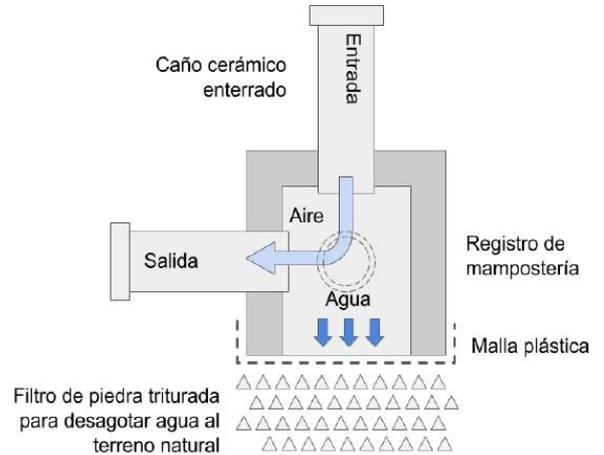


Las salidas de aire se encuentran situados en la base de los muros del interior de los dormitorios y living-comedor.

Estas rejillas pueden ser operadas manualmente y algunas cuentan con un sistema mecánico de extracción para insuflar el aire del sistema al interior de los ambientes

Foto: Arq. Lucía Mussi

Registro de desagote



Esquema en planta del sistema de desagote para evitar la acumulación de agua dentro de los caños. El registro semiabierto permite la infiltración del agua al terreno a través de un filtro de grava y malla textil.

Fuente: elaboración propia



El registro de desagote se encuentra abierto en uno de sus lados y se cubre con una malla y un filtro de grava que permite la filtración del agua al terreno natural. Varios de estos registros se distribuyen a lo largo del sistema ICTA.

Fuente: Arq. Yago García-Enriquez

Para la construcción del sistema se excavaron de forma manual dos zanjas en terreno arcilloso. Estas zanjas de 2,50 metros de profundidad, construidas principalmente bajo el área de la vivienda, poseen cada una un desarrollo de 23 y 33 metros lineales en forma de U, con un segmento compartido de 7 metros de largo.

Los ductos fueron construidos a partir de caños cerámicos de 25 cm de diámetro y se encuentran enterrados a profundidades entre 1,70 y 2,50 metros con una pendiente del 1%. La distribución de los ductos se da de la siguiente manera: un caño con una entrada y una salida y 30 metros de largo para el área de living-comedor y cocina, un caño con una entrada y una salida y 20 metros para el dormitorio principal y un caño con una entrada y cuatro salidas al final de 40 metros de desarrollo para servir a los cuatro dormitorios restantes mediante dos caños verticales con salidas compartidas.

El flujo del aire se da de forma natural a excepción de los dos dormitorios más alejados de la entrada de aire. Estos dormitorios poseen un extractor en la salida del sistema.

Observaciones sobre la implementación del ICTA en el Caso 3

Resulta interesante y original la solución constructiva de las trampas de desagote para eliminar el agua proveniente de condensación o filtración.

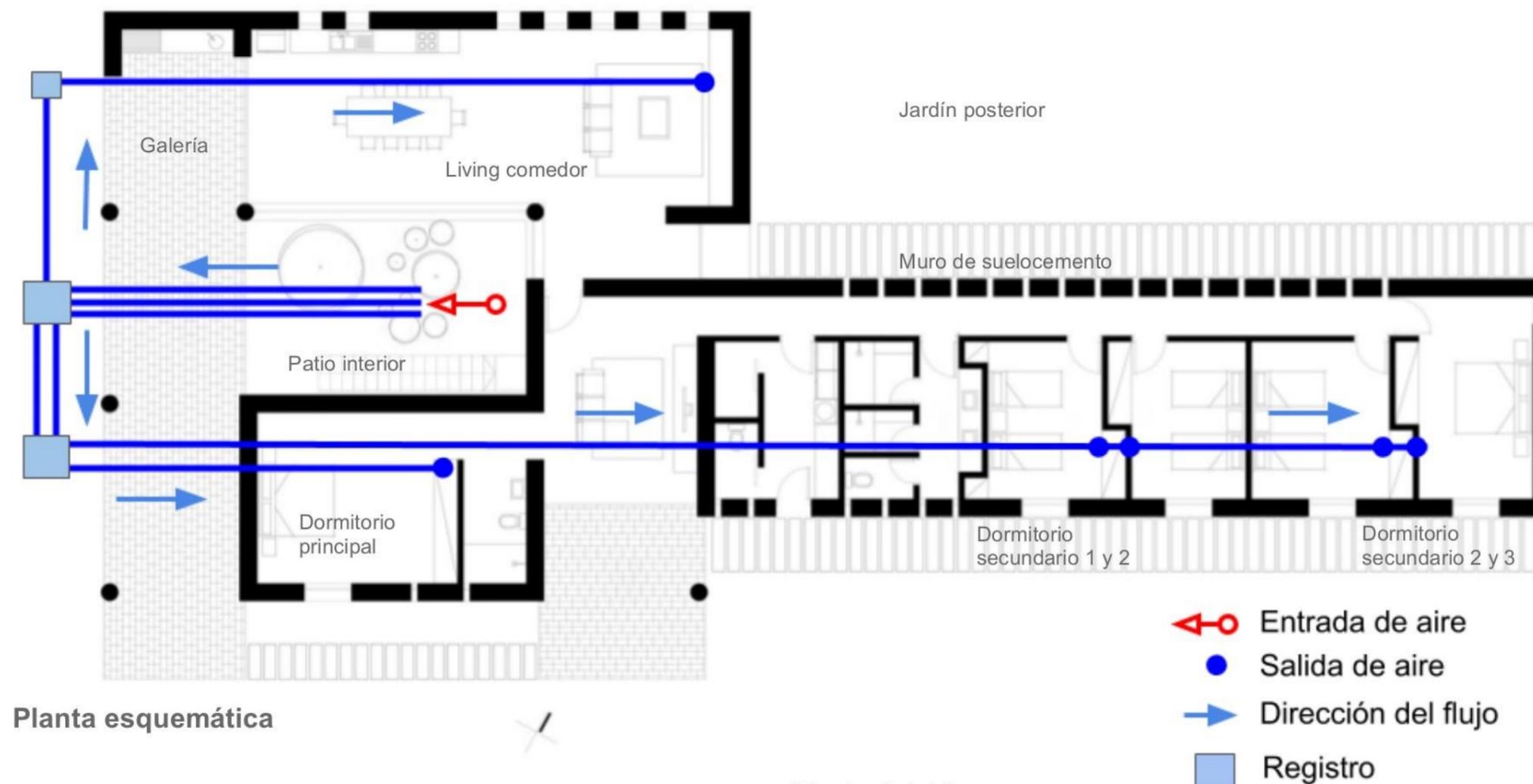
A diferencia de los casos anteriores, las salidas de los ductos se encuentran en serie, por lo que es difícil asegurar la circulación del aire a través de estos desde la entrada. En los registros de desagote convergen varias cañerías, lo cual contribuye al problema de circulación de aire.

Cabe notar que para la construcción del sistema se optó por la utilización de caños cerámicos, lo cual no es recomendable debido a la vida útil y condiciones de higiene inferiores con respecto a los caños de PVC.

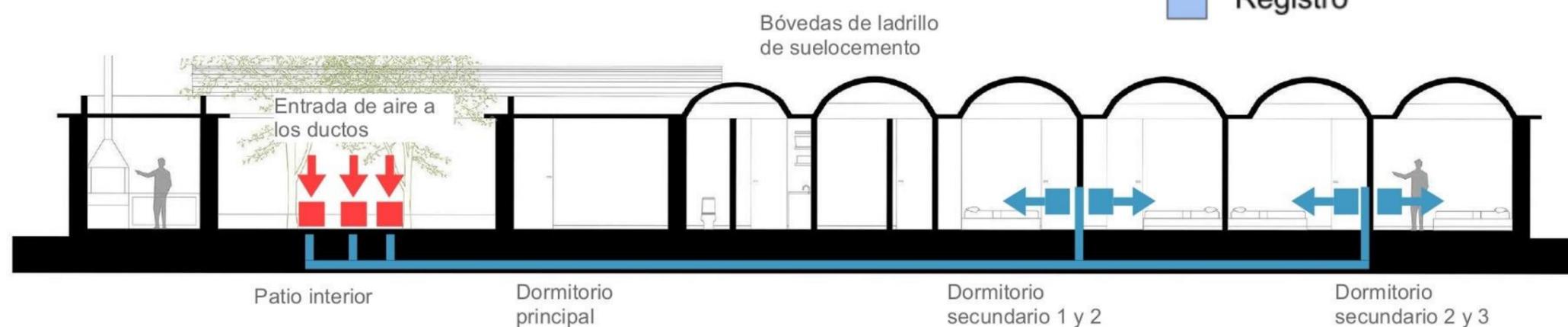
El sistema no dispone de un control de operación ni cuenta con un ventilador axial en la entrada para controlar y asegurar el caudal del aire en las salidas.

Ilustración 25: Diseño del sistema utilizado en la Vivienda Takuru, Caso 3

Trazado del recorrido de los ductos



Planta esquemática



Corte longitudinal

Fuente: Elaboración propia en base a documentación proveída por Arq. Yago García-Enriquez

Los ductos fueron organizados en circuitos independientes, bajo la superficie construida y unidos en sectores por una cámara o registro de desagote (ver detalles esquemático). Cabe destacar que el tramo a los dormitorios secundarios fue trazado en serie.

La entrada de aire fue planteada en un patio interior, cubierto de vegetación. Las salidas fueron colocadas a nivel de zócalo en los ambientes principales, haciendo coincidir con los espacios de ropero.

La conexión en serie debilita el flujo del aire, por lo que en sectores comprometidos, se optó por colocar unos extractores mecánicos en los dormitorios secundarios.

2.2.4. Comparaciones entre los casos estudiados

Los casos locales analizados presentan algunas características comunes y otras particulares de cada caso. A partir del estudio del marco teórico se pueden identificar la efectividad de cada una de ellas.

Cuadro 17: Características generales de los casos estudiados

	Área	Profundidad	Cantidad	Longitud	Diámetro	Material
Caso 1: Prototipo Sostenible	38 m ²	2,5 m	1	113 m	Ø 200 mm	PVC
Caso 2: Sala Politécnica	-	4 m	1	20 m	Ø 200 mm	PVC
Caso 3: Vivienda Takuru	350 m ²	1,70-2,50 m	3	20-40 m	Ø 250 mm	Cerámico

Fuente: elaboración propia

Podemos observar que, entre los tres casos, el Caso 1 posee la mayor longitud de ductos y, por ende, la mayor superficie para la transferencia de calor tierra-aire, lo cual podría significar un mejor desempeño del sistema.

En el Caso 2, la longitud de los ductos, la más corta entre los casos estudiados, es compensada en cierta medida por el nivel de profundidad de este, que es mayor a los otros dos casos analizados.

El Caso 3 registra niveles de profundidad variables, el ducto con mayor diámetro entre los tres casos, y el único en utilizar material cerámico para la construcción del sistema, lo cual podría traducirse en menor vida útil y una posible disminución de la calidad del aire.

Cuadro 18: Características particulares de las aplicaciones locales

	Caso 1: Prototipo Sostenible	Caso 2: Sala Politécnica	Caso 3: Vivienda Takuru
Registro o colector	Sí	Sí	Sí
Ventilador mecánico	Sí	Sí	No
Sensores de temperatura	Temporal	Temporal	No
Control de operación	Sí	Sí	No
Protección en entrada	Sí	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia

Los casos presentan similitudes y diferencias en cada uno de los factores que hacen a la eficiencia del sistema.

Cuadro 19: Comparativo de los casos estudiados

Característica	Caso 1: Prototipo Sostenible	Caso 2: Sala Politécnica	Caso 3: Vivienda Takuru
Control de temperatura del suelo	Superficie cubierta con vegetación	No tiene	No tiene
Disposición	Lineal	Lineal	Ramificado
Orientación	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Circuito	Abierto	Abierto	Abierto
Material del ducto	PVC	PVC	Cerámico
Rugosidad del ducto	Liso	Liso	Poroso
Longitud del ducto	113 m	20 m	20-40 m
Diámetro del ducto	200 mm	200 mm	250 mm
Separación entre ductos	80 cm	-	80 cm
Cantidad de ductos	1	1	3
Profundidad del ducto	2,50 m	4,00 m	1,70 a 2,50 m
Flujo de aire	Ventilador Axial en entrada de aire	Ventilador Axial en entrada de aire	Extractor en salida de aire
Control de operación	Manual	Manual	No tiene
Pendiente	0,01	Sin datos	0,01
Control de humedad del suelo			
Herramientas de diseño	Design Builder	Algoritmo matemático	No tiene

Fuente: elaboración propia

Cuadro 20: Análisis de pautas de diseño por caso de estudio

Pauta de diseño	Caso 1: Prototipo de Vivienda Sostenible	Caso 2: Sala Politécnica	Caso 3: Vivienda Takuru
Control de temperatura del suelo	La estrategia consiste en plantar vegetación sobre el recorrido de los ductos para proteger el suelo de la radiación solar y mantener la temperatura	El tramo se encuentra bajo la sombra de árboles que protegen el suelo de la radiación solar	Los tramos se encuentran bajo el edificio cuya estructura protege el suelo de la radiación solar, manteniendo la temperatura
Disposición de ductos	El recorrido lineal en zigzag horizontal optimiza al máximo la zona de excavación, logrando duplicar el desarrollo de los ductos con respecto a la longitud de la zanja	El recorrido lineal horizontal	El sistema ramificado en serie, conectado por registros, no es ideal debido a que el sistema pierde presión y no es posible asegurar el caudal o renovación del aire
Circuito	El circuito abierto toma aire del exterior mediante un nicho anexado a una construcción cercana y lo conduce a un espacio central al interior de la vivienda	Se observa un circuito abierto	El circuito abierto toma aire de un patio interior cubierto de vegetación, aprovechando el microclima que pre-enfría el aire de entrada
Tipo y material del ducto	Caño de PVC de 200mm	Caño de PVC de 200mm	Caño cerámico de 250mm
Geometría del ducto	La longitud, rugosidad y diámetro del ducto no perforado son óptimos para una transferencia de calor adecuada	La longitud menor a la recomendada es compensada por el parámetro de profundidad. A su vez, la rugosidad y diámetro del ducto no perforado son óptimos para una transferencia de calor adecuada	Las longitudes varían y sus ramificaciones hacen difícil estimar la longitud efectiva de cada tramo. La rugosidad del material cerámico y su diámetro no son los recomendados
Cantidad de ductos	Un caño único provee de aire al monoambiente	Un caño único alimenta una habitación	Tres caños y sus derivaciones distribuyen el circuito a cinco ambientes
Tipo de suelo	Se determinaron las características del suelo por analogía y se utilizaron los datos para realizar un modelo analítico	Se determinó el tipo de suelo, utilizándose este dato para hacer el modelo analítico y obtener resultados preliminares del desempeño del sistema	No se utilizaron los datos del suelo para realizar un modelo analítico del sistema
Profundidad del ducto	El nivel de profundidad del ducto es adecuado	El ducto fue enterrado a 4 metros de profundidad, lo cual no es costo-efectivo, pero compensa la longitud inferior del recorrido del ducto de apenas 18 metros	El nivel de profundidad del ducto es adecuado
Flujo de aire	El flujo es controlado por un ventilador axial para asegurar la renovación de aire	Flujo es controlado por un ventilador axial de 3 velocidades	No se identifica un mecanismo, activo o pasivo, que asegure el flujo de aire del exterior al interior
Control de operación	Manual, mediante el encendido y apagado del ventilador axial	Manual, mediante el encendido, regulación de potencia y apagado del ventilador axial	No se identifica un mecanismo, manual o automático, que permita la operación del sistema
Pendiente de desagote	Pendientes del 1% conducen el agua de condensación a registros a registros de desagote	No se identificó la utilización de pendientes o registros de desagote	Pendientes del 1% conducen el agua de condensación a registros a registros de desagote
Humedad del suelo	Si bien no se identifica un método de humectación del suelo, la superficie vegetal supone un riego constante que mantiene el suelo húmedo	No se identifica una estrategia de humectación del suelo	Si bien no se identifica un método de humectación del suelo, el edificio cubre el recorrido de los ductos manteniendo la humedad natural del suelo
Estrategias complementarias	Se destaca la utilización de cubierta vegetal, aislación de muros y complementación con sistemas de acondicionamiento activo	No se identificaron estrategias complementarias	Se destaca la utilización de muros de suelo cemento como elementos de regulación de temperatura (masa térmica)
Herramientas de diseño	Se utilizaron modelos computacionales para validar el diseño durante la fase de planificación	Se recurrió a algoritmos para el cálculo y predicciones del desempeño del sistema. Estos cálculos fueron validados por el modelo experimental	No se utilizaron herramientas para el diseño y modelado para validar el sistema
Estado	Inoperativo. La obra fue una instalación temporal y a la fecha ya no se encuentra operativa	Inoperativo. La obra fue una construcción temporal con fines de experimentación y a la fecha no se encuentra activa	Operativo. La vivienda se encuentra activa y habitada

Fuente: elaboración propia

Se identificó que en Paraguay existen diversas maneras de diseñar y construir un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Los casos donde existieron mediciones experimentales demuestran que la disminución de temperatura a la salida del sistema es considerable. El monitoreo de las temperaturas comprueba que el sistema es efectivo durante periodos de calor y de frío.

Para hacer una evaluación más completa y determinar sus ventajas y desventajas se debe comparar el sistema intercambiador de calor tierra-aire al sistema comúnmente utilizado para climatización de viviendas, el aire acondicionado tipo Split.

CAPÍTULO III: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS ESTUDIADOS EN EL CAPÍTULO ANTERIOR

Utilizando el Marco Teórico y el capítulo anterior como referencia, en este capítulo se procederá a identificar las ventajas y desventajas, de la utilización del sistema intercambiador de calor tierra-aire para el acondicionamiento de viviendas comparado a un sistema tradicional de aire acondicionado tipo Split, con evaporador y condensador.

3.1. Ventajas del sistema ICTA con respecto al sistema tradicional de aire acondicionado tipo Split

Existen varias ventajas en la adopción de un sistema intercambiador tierra-aire con respecto a un sistema de aire acondicionado convencional tipo Split.

3.1.1. Simplicidad y mano de obra no especializada

Un sistema intercambiador de calor tierra-aire construido a base de caños de PVC puede ser construido y mantenido por mano de obra no especializada. Esto se traduce en un fácil control y mantenimiento. Por el contrario, un sistema de aire acondicionado tipo Split posee una tecnología compleja que requiere de mano de obra especializada para su construcción, instalación y mantenimiento, limitando el alcance de la tecnología a comunidades remotas y de escasos recursos.

3.1.2. Control local y participativo

La construcción y mantenimiento de un sistema intercambiador de calor tierra-aire en base a caños de PVC puede realizarse de forma local y participativa. La apropiación de tecnología local por los usuarios da lugar a comunidades sostenibles, empoderadas y resilientes. En cambio, la tecnología relativamente compleja de un acondicionador de aire tipo Split es controlada por los expertos, requiere de importación de productos y da lugar

a sociedades tecnocráticas donde las comunidades tienen poco control sobre la tecnología y su participación se ve limitada.

3.1.3. Pequeña escala y descentralizado

La construcción de un sistema intercambiador de calor tierra-aire es local y no requiere de plantas industriales de gran escala para su fabricación.

Tanto su producción como operación es descentralizada. Su bajo consumo energético le permite operar fuera de la red de distribución eléctrica permitiéndole operar en comunidades distantes, favoreciendo el acceso y la apropiación de la tecnología. Los sistemas de acondicionamiento tipo Split requieren de plantas industriales de gran escala, la centralización de la producción, explotación e importación de recursos para su fabricación e instalación.

3.1.4. Ecológicamente apropiado y energéticamente eficiente

El sistema intercambiador de calor tierra-aire aprovecha la energía local, disponible y renovable acumulada del suelo para responder los requerimientos de confort térmico del hábitat humano. Esto se traduce en mayor eficiencia, menor consumo energético, mayor aprovechamiento de los recursos naturales y menor contaminación.

3.1.5. Economía durante el ciclo de vida

Se reporta un ahorro económico positivo en relación con sistemas tradicionales en aplicaciones para el enfriamiento, debido a que los ductos subterráneos le permiten al usuario prescindir de un sistema de aire acondicionado activo de alto consumo energético. Si bien los ductos subterráneos son comúnmente utilizados para enfriar el aire en periodos calurosos, se tiene el beneficio adicional de poder usarlos para pre-calentar el aire durante el clima frío.

Un análisis comparativo de costos basado en la necesidad de climatizar una vivienda de 3 dormitorios expuesto en el Capítulo V, determinó que a partir del 4 año de operación, el sistema ICTA recupera su inversión inicial y empieza a generar ahorros mensuales de hasta Gs. 9.000.000 anuales.

Cuadro 21: Matriz de costos relativos

Costos	Sistema ICTA	Sistema Split
Instalación obra nueva	Mayor	Menor
Instalación readecuación	Mayor	Menor
Mantenimiento	Menor	Mayor
Operación	Menor	Mayor

Fuente: elaboración propia

3.1.6 Incentivos económicos, impositivos y reconocimientos

Existen otros factores importantes a la hora de realizar una evaluación económica como los incentivos impositivos establecidos por los municipios de la capital de Asunción, los bonos de verdes y el valor de las certificaciones internacionales conocidos como sellos verdes o de eficiencia energética.

3.1.7 Libre de ruido

Un sistema ICTA no produce los ruidos molestos relacionados a un compresor de aire acondicionado. Los ventiladores axiales de bajo consumo operan de forma silenciosa y pueden situarse a varios metros de la edificación

3.1.8 Mejor calidad de aire y mayor confort térmico

A diferencia de un sistema de aire acondicionado tradicional, un sistema ICTA de circuito abierto en buen estado ofrece una renovación de aire constante, lo que se traduce a una mejor calidad de aire y mayor confort.

3.2. Desventajas del sistema ICTA con respecto al sistema tradicional de aire acondicionado tipo Split

Además de beneficios, se identificaron algunas desventajas de los intercambiadores de calor tierra-aire con respecto al sistema de acondicionamiento convencional tipo Split.

3.2.1. Costo Inicial

El costo inicial de construcción de un sistema intercambiador tierra-aire es más elevado con respecto al de un sistema acondicionador tipo Split. El mayor gasto corresponde al rubro de excavación, como veremos en el último

capítulo. En cambio, el sistema de acondicionamiento tipo Split tiene un costo inicial menor en relación con el sistema ICTA. La instalación del sistema de aire acondicionado tipo Split es sencilla (aunque requiere de mano de obra especializada) y no necesita de obras complementarias. Además, existen una variedad de opciones en el mercado y oportunidades de financiamiento que hacen que la elección del sistema tipo Split sea más atractiva económicamente. Según el análisis expuesto en el último capítulo, el costo inicial de un sistema ICTA es casi 4 veces más costoso que un sistema tipo Split.

3.2.2. Requerimientos de espacio

Para asegurar el intercambio de calor y optimizar el desempeño, se requiere de una gran área para instalar un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Esto dificulta su implementación en lotes pequeños, construcciones existentes y zonas de media y alta densidad. Según nuestro análisis, una vivienda de 85 m² requiere de una superficie de excavación de 90m² y movimiento de suelo equivalente a 270 m³. Salvo por la ubicación de los equipos compresores, el sistema Split no requiere de espacio adicional para su instalación.

3.2.3. Acumulación de agua

Los principales problemas asociados al sistema de ductos subterráneos tienen que ver con la posible acumulación de agua dentro de los ductos y sus consecuentes problemas con relación a la calidad del aire.

Es fundamental el control de humedad generada ya sea por condensación del aire de entrada o por filtración de agua del terreno. La humedad puede ocasionar la aparición de bacterias y moho. Otro potencial peligro es el ingreso de radón, un gas radioactivo que se encuentra en algunos tipos de suelo y que presenta un peligro a la salud de las personas.

En el sistema tipo Split, el agua generada por condensación es fácilmente desagotada mediante una manguera de media pulgada conectada al equipo evaporador.

Cuadro 22: Ventajas y desventajas del sistema ICTA con respecto a un sistema de aire acondicionado convencional

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Alta eficiencia• Ahorro energético• Buena calidad de aire• Mayor confort térmico• Fácil control• Equipamiento sencillo• Bajo costo de mantenimiento• Ambientalmente amigable• Beneficios impositivos• Libre de ruido	<ul style="list-style-type: none">• Mayor costo inicial (ver análisis)• Propensos a contaminación por acumulación y agua y crecimiento bacteriano• Mayor requerimiento de espacio• Barreras de adopción de innovación

Fuente: Elaboración propia

Los mayores obstáculos para la aceptación del sistema ICTA están relacionados a la calidad del aire, el costo inicial, el área requerida y la conciencia sobre beneficios de utilizar el sistema. También es importante evaluar el contexto. Una cosa es argumentar a favor del uso de un sistema ICTA cuando el edificio debe ser concebido como una construcción sostenible, y otra discusión es presentar el concepto de ICTA cuando la sostenibilidad no es un objetivo primordial.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas del intercambiador de calor tierra-aire con respecto a un sistema Split convencional, se definirán las pautas de diseño de los ductos enterrados para la optimización del sistema en una vivienda.

CAPÍTULO IV: PAUTAS DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS PARA EL ACONDICIONAMIENTO PASIVO DE VIVIENDAS.

Teniendo en cuenta los tres casos de estudio y la información analizada en el marco teórico, se pueden determinar los aspectos a tener en cuenta para la implementación efectiva y eficiente de un sistema intercambiador de calor tierra-aire en una vivienda. Para su estudio, clasificamos estas pautas en Planificación; Construcción; Operación.

Los objetivos de los sistemas de los intercambiadores de calor tierra-aire deberán ser alcanzar la mejor eficiencia operativa, con el menor costo operativo y área de superficie para incrementar los niveles de confort y la durabilidad del sistema y facilitar su utilización y mantenimiento.

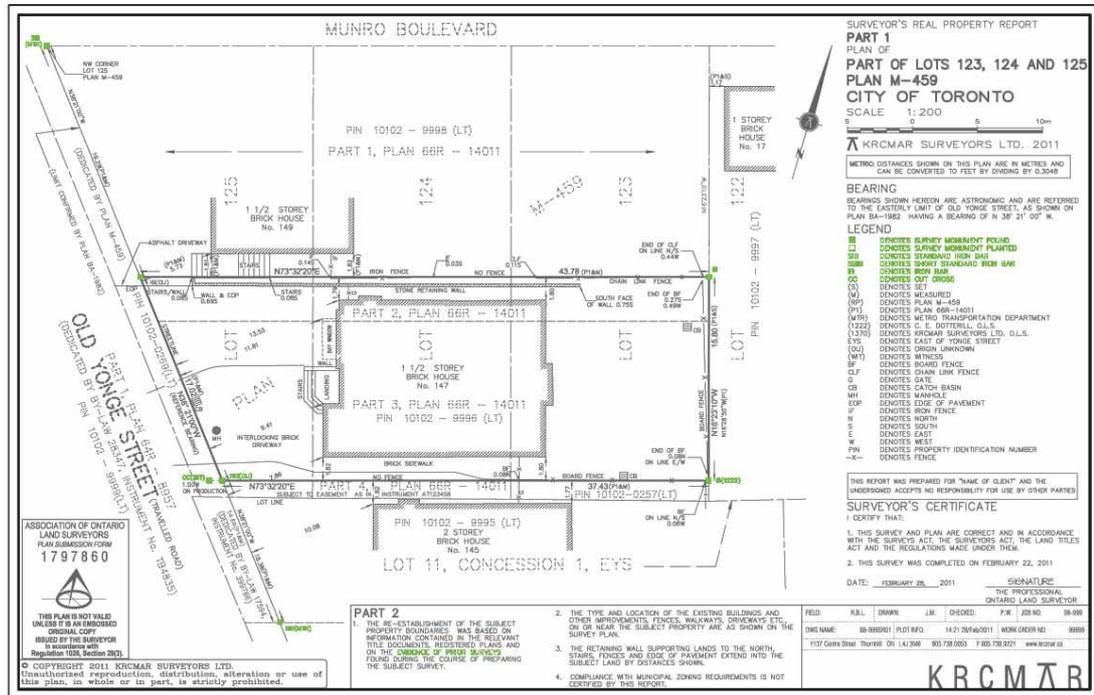
4.1. Planificación del ICTA

Para optimizar el diseño y construcción del sistema intercambiador de calor tierra-aire, economizar esfuerzos y recursos, es necesaria una correcta planificación antes de iniciar la construcción.

El diseño empieza con el relevamiento del área a intervenir. Dependiendo de la escala del proyecto, el relevamiento puede ser realizado con métodos de medición convencionales, plano de relevamiento topográfico (ver Ilustración 25), solicitando una copia al departamento de catastro o basarse en la documentación existente (planos de loteamiento o título de propiedad). También es posible consultar fuentes en línea como Google Maps, Google Earth o el Servicio Nacional de Catastro. En cualquier caso, es recomendable verificar los datos obtenidos antes de proseguir con el diseño del trazado.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Ilustración 26: Plano de relevamiento del terreno



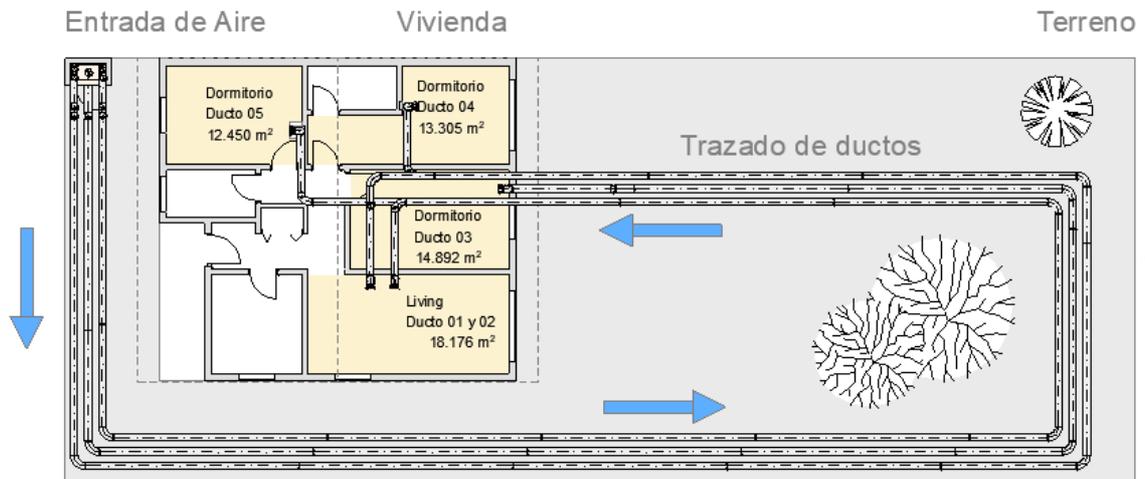
Fuente: KRCMAR Surveyors

Es importante planificar el espacio donde estará la entrada de aire al sistema. La entrada de aire debe estar libre de cualquier fuente de polución, ya que el aire que ingrese al sistema deberá ser fresco y puro. Por eso es necesario mantener las entradas de aire alejadas de fuentes emisoras de gases, como generadores, vehículos, fuentes de combustión como hornos, parrillas o fuentes de olores como basureros, cloacas, etc. Las entradas de aire deben plantearse en el interior de los ambientes a climatizar.

Con estas consideraciones, se procede al trazado de los ductos. Es conveniente aprovechar el ancho de la zanja para colocar más de un ducto y mantener un trazado simple, con la mínima cantidad de codos y curvas, para facilitar el flujo de aire y evitar las caídas de presión (ver Ilustración 26).

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Ilustración 27: Planificación del trazado



Fuente: Elaboración propia

4.2. Construcción del sistema

Una vez terminada la planificación y proyecto de diseño se procede a la construcción del sistema. Para eso es necesario contar con los materiales y herramientas adecuados y seguir una técnica constructiva que asegure la calidad, duración y el buen funcionamiento del intercambiador de calor tierra-aire.

4.2.1. Materiales y herramientas

Para la construcción del ICTA se requieren caños de PVC de 200 mm, codos de 45 grados, codos de 90 grados, uniones para caños, tubos de espuma de polietileno para aislación de caños en los tramos de salida, tela metálica, rejillas de ventilación, ventilador axial con potencia según calculo. Para la construcción de la caseta de entrada que alberga el sistema de impulsión de aire, se requieren cemento, cal, arena, ladrillo, cascotes y un sistema de cerramiento metálico con rejillas (ver Cuadro 23).

Cuadro 23: Materiales necesarios

Caños de PVC 200 mm	Codos de 45 grados	Curva de 90 grados
		
Uniones para caños	Ventilador axial	Rejillas de ventilación
		

Fuente: Elaboración propia

Aunque es posible realizar la excavación de forma manual mediante palas, es recomendable la utilización de una zanjadora o retroexcavadora para la ejecución de las zanjas si se disponen los medios económicos y tecnológicos. Será necesario un taladro con mecha de 1/2" para realizar las perforaciones para el desagote de los caños, cinta métrica, marcador y una sierra para cortar los caños (ver Cuadro 24).

Como material de relleno se utilizará la tierra proveniente de la excavación de las zanjas, además de arena lavada para asentar los caños y mejorar la transferencia de calor entre el suelo y el ducto y, por último, piedra triturada como filtro natural en sectores de desagote.

Cuadro 24: Herramientas necesarias

<p>Taladro</p> 	<p>Mecha ½"</p> 	<p>Cinta métrica</p> 
<p>Marcadores</p> 	<p>Sierra</p> 	<p>Retroexcavadora o zanjadora</p> 

Fuente: Elaboración propia

Se deberá considerar la utilización de tablonces de madera, puntales o chapas trapezoidales en caso de que exista necesidad de contener las paredes el suelo durante la excavación de las zanjas.

4.2.2. Excavación de las zanjas

Existen varios métodos y tecnologías para la excavación de las zanjas. Dependiendo del presupuesto y situación particular de cada terreno, las zanjas podrán ser ejecutadas a mano, con una zanjadora, tractor o retroexcavadora. Las zanjas deben llegar a una profundidad mínima de dos metros para aprovechar las propiedades térmicas del suelo y permitir una transferencia de calor efectiva. Profundidades entre 2 a 3 metros son las más eficientes, ya que la temperatura del suelo se mantiene constante y próxima a la media anual durante todo el año. Profundidades mayores a 3 metros resultan muy costosas, mientras que zanjas inferiores a los 2 metros no son eficientes.

Ilustración 28: Excavación de zanjas



Fuente: SDAC Studio

Antes de iniciar la excavación, se deberán considerar las condiciones del suelo, las dimensiones del terreno y las preexistencias, la presencia de napa freática y todos los demás factores que puedan condicionar la ejecución de los trabajos. Se recomienda la contratación de un profesional realizar un plan de excavación adecuado al tipo de suelo y condiciones del sitio.

Cuadro 25: Consideraciones previas a la excavación

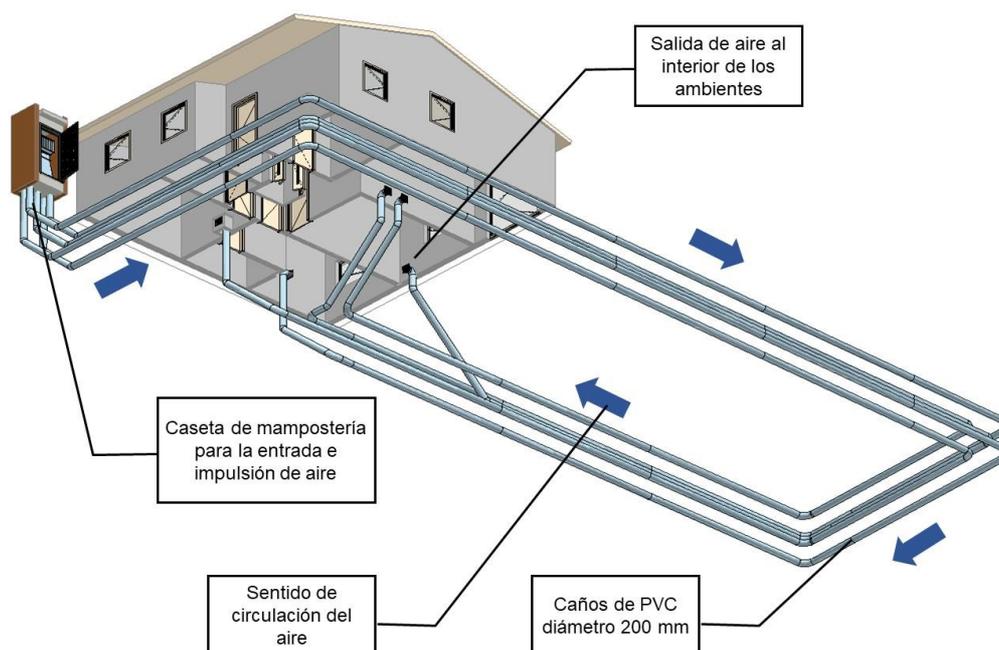
Consideración previa	Explicación
Estudios previos	Es necesario contar con un plan de excavación realizado por un profesional y un estudio geotécnico para determinar la composición del suelo y el nivel de napa freática.
Dimensiones y condiciones del terreno	Si el terreno es de dimensiones reducidas, la excavación puede ser dificultosa.
Profundidad del suelo firme	Un suelo rocoso podría impedir la realización de la excavación. Así también
Profundidad de la napa freática	La presencia de napa freática podría impedir la construcción del sistema.
Árboles y vegetación existente	Árboles de gran porte pueden impedir o dificultar la realización de los trabajos.
Instalaciones y servicios	Desagües existentes, pozos, tanques inferiores, cámaras sépticas, servidumbres de paso, deben ser identificados al momento de planificar el sistema e iniciar la excavación
Normativas y permisos municipales	En algunos casos y dependiendo del municipio, se deberán contar con los permisos municipales para realizar las excavaciones.

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Colocación de ductos

Concluida la excavación, se procede a apisonar el fondo del suelo a todo lo largo de la zanja. Deberán preverse y verificar las pendientes del fondo de la zanja antes de colocar los ductos.

Ilustración 29: Esquema axonométrico del trazado de ductos



Fuente: elaboración propia

A continuación, se colocan los caños de PVC, uniéndose unos con otros, verificando la correcta unión de las juntas y manteniendo la pendiente de desagote de 1% a 2%. Se debe asegurar que todos los tramos del ducto se encuentren correctamente asentados y soportados firmemente por el suelo. De lo contrario, al momento de rellenar la zanja, los caños pueden dañarse o asentarse con el tiempo, ocasionando problemas.

En los sectores designados para desagote, se colocan los caños perforados con los hoyos hacia abajo, envueltos en geotextil, sobre una cama de 5 cm de piedra triturada, de manera a permitir la filtración, evitando el ingreso de tierra al interior del ducto, siempre y cuando las condiciones del terreno lo permitan y no exista presencia de agua subterránea en el terreno.

Ilustración 30: Colocación de los ductos en la zanja



Fuente: SDAC Studio

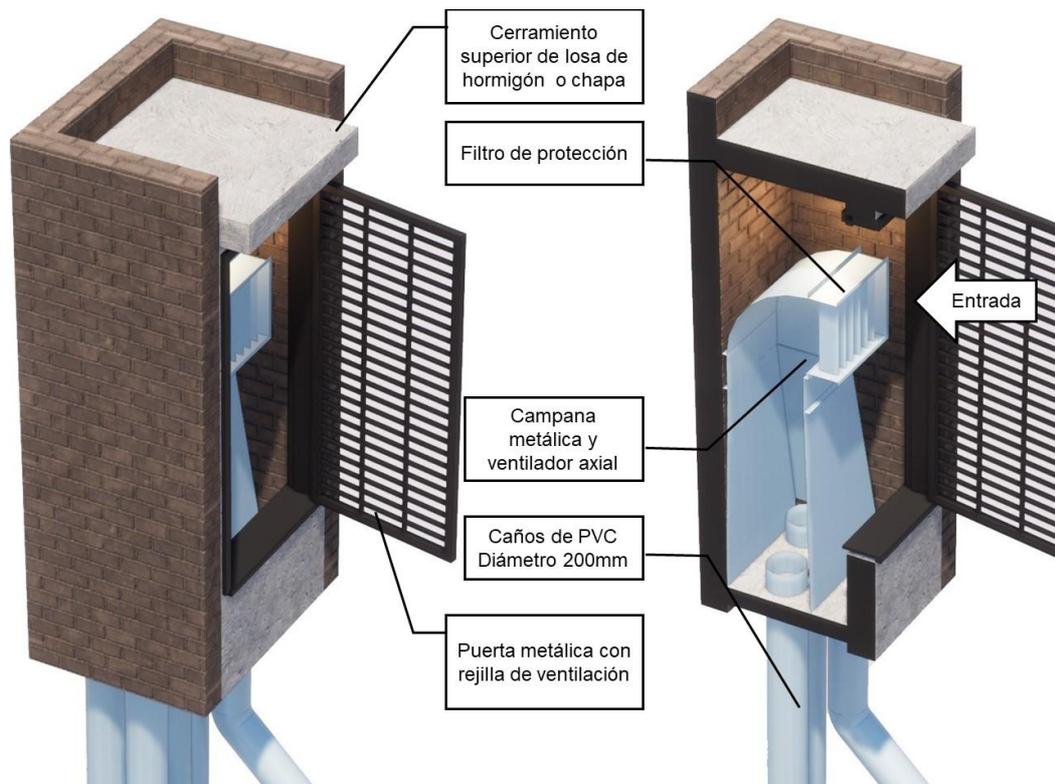
4.2.4. Entrada de aire

La velocidad del aire influye en el desempeño del sistema. A medida que el flujo de aire aumenta, el aire permanece menos tiempo dentro de los ductos y, por ende, menos tiempo en contacto con la temperatura del suelo.

Mientras que cuando el flujo disminuye, existe un mayor contacto y transferencia de calor entre el suelo y el aire, lo que mejora la eficiencia del sistema. Para poder controlar y optimizar el flujo de entrada de aire es fundamental contar con un ventilador axial en la entrada del sistema.

Los ventiladores axiales tienen un bajo consumo de energía con relación a sistemas de aire acondicionado, baja emisión de ruido, son altamente eficientes y están diseñados para sistemas de media y baja presión. Son capaces de desplazar grandes volúmenes de aire y operar de forma continua, lo que los hace ideales para su uso en sistemas ICTA. En Paraguay existen fabricantes locales que pueden diseñar a medida, fabricar, reparar y mantener ventiladores axiales por lo que su uso es ideal para complementar el sistema ICTA.

Ilustración 31: Caseta de entrada de aire



Fuente: Elaboración propia

Para albergar el ventilador axial y distribuir el aire entre los ductos se plantea una caseta de mampostería con cerramiento de persianas metálicas,

en cuyo interior, una campana de chapa encausa el aire impulsado por el ventilador axial hacia la entrada de los ductos (ver Ilustración 30). Es necesario colocar una malla metálica o de nylon en la entrada de los ductos para impedir el ingreso de insectos y animales pequeños. Se debe proyectar la entrada a una altura superior a 60 cm del suelo para evitar que animales pequeños ingresen al ducto o dañen la malla protectora. También es recomendable la instalación de filtros de aire en la entrada del sistema para mantener la calidad del aire y evitar el ingreso de polvo, polen y otras partículas no deseadas que pudieran contaminar el interior de los ductos.

Para cumplir con todos estos requisitos, será necesario contar con una estructura en forma de nicho o caseta, que albergue todos los componentes del sistema de impulsión de aire.

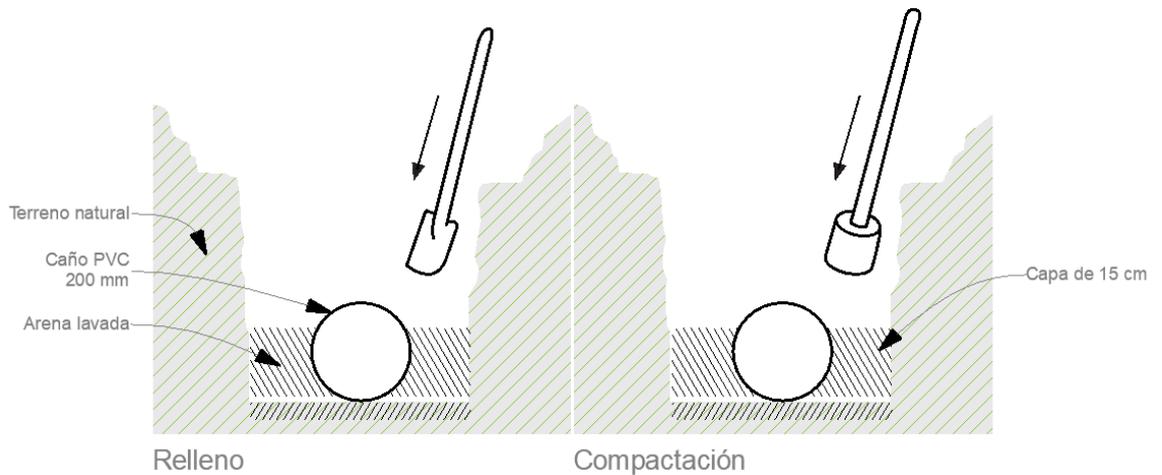
4.2.5. Salida de aire

Una vez que se llega a los extremos de los ductos, se ubican los codos a 45 grados orientados hacia las salidas. En esta etapa es importante verificar los ángulos y posición de los caños antes de realizar las uniones y proceder al relleno de las zanjas. Es necesario aislar el tramo de salida, donde el ducto retorna a la superficie, para evitar ganancias de calor. Para ello se recomienda la utilización de tubos de espuma de polietileno revestidos con foil de aluminio de 12 mm de espesor o un recubrimiento de lana de vidrio. Las salidas irán sobre el nivel de zócalo. Una estrategia de diseño es ubicarlas bajo placares o equipamiento fijo. Como detalle de terminación y barrera de protección se recomienda la instalación de rejillas de ventilación en las salidas, además de mallas metálicas o nylon.

4.2.6. Relleno de las zanjas

Una vez que los caños de PVC se encuentren asentados en su lugar, se deberán rellenar los laterales del ducto con arena lavada, apisonando el material de relleno hasta lograr una capa compacta que cubra toda la superficie del caño (ver Ilustración 31). Se debe lograr una compactación lo suficientemente firme para disminuir las deformaciones de los caños debido a las cargas del suelo.

Ilustración 32: Relleno y compactación de las zanjas



Fuente: Elaboración propia

El resto de las capas se rellenarán con la tierra proveniente de la excavación, compactada en capas sucesivas y superpuestas de 30 centímetros de espesor. Además de facilitar el correcto asentamiento, la capa de arena asegura una adecuada transmisión de calor entre el ducto y el terreno, mejorando la eficiencia del sistema.

Se recomienda que la superficie exterior de los caños esté cubierta de arena, ya que los suelos arenosos capturan y disipan calor más eficientemente comparados a otros tipos de suelo, lo que mejora el desempeño del sistema.

4.2.7. Construcción existente

Si bien es más económico y efectivo prever el sistema intercambiador de calor tierra-aire antes de iniciar la construcción, es posible implementar el sistema a una construcción existente siempre que haya suficiente área libre para realizar la excavación de las zanjas. En ese caso, otras opciones pueden ser analizadas, como los ductos subterráneos colocados en espiral, serpentina u octogonales. Se recomienda tener especial cuidado en la contención del suelo durante la excavación de las zanjas para proteger la estructura existente.

4.3. Operación y funcionamiento

Parte importante del desempeño del sistema depende en estrategias de operación y funcionamiento. Se deben adoptar métodos de control que activen y desactiven el sistema en condiciones no óptimas. No mediante un control de tiempo sino de condiciones de temperatura. Estableciendo un control manual o automático que active el sistema de impulsión de aire solamente durante momentos donde se necesite alcanzar un confort térmico es posible obtener un mayor ahorro y eficiencia energética.

Alternativamente, se pueden bloquear las salidas de forma independiente para evitar flujos no deseados en momentos en que no se requiera la operación del ICTA.

4.3.1. Combinación con otros sistemas

Para una mayor efectividad y eficiencia del sistema, se debe considerar la combinación del sistema intercambiador de calor tierra-aire con otros sistemas pasivos o activos de climatización como chimeneas solares, ventilación mecánica, ventilación nocturna, sistemas de protección solar, correcta orientación del edificio, y/o sistemas de aire acondicionado convencionales, etc.

4.3.2. Mantenimiento

La disposición de los ductos y la profundidad a la que se encuentran hace que su limpieza sea difícil. Pero existen métodos y herramientas que pueden emplearse para facilitar la limpieza y el mantenimiento del sistema (ver Cuadro 26). Construyendo registros que faciliten el acceso a los ductos, utilizando la extensión de una aspiradora para aspirar objetos extraños, utilizando un generador de ozono para inyectar gas en el interior de los ductos para eliminar olores, moho, algas, insectos y bacterias es posible mantener el sistema en buenas condiciones y prolongar de forma indefinida la vida útil del intercambiador de calor.

Cuadro 26: Herramientas mantenimiento para un sistema ICTA

Generador de ozono	Extensión para aspiradora	Filtros de aire
		

Fuente: Elaboración

También es importante el mantenimiento y limpieza periódico de los filtros de aire en la entrada y salida del sistema, las mallas o rejillas de protección y los elementos del sistema de impulsión de aire (ver Cuadro 27).

Cuadro 27: Técnicas de mantenimiento de un sistema ICTA

Registros de inspección	Registros ubicados a cierta distancia pueden facilitar la limpieza de los ductos
Aspiradoras con extensión	Con extensiones apropiadas, las aspiradoras pueden extraer todo tipo de objetos extraños del interior de los años.
Gas de ozono	La inyección de gas de ozono desinfecta el interior de los ductos y elimina olores, moho, bacterias, algas, insectos y otros contaminantes.
Cambios de filtro	Un cambio periódico de los filtros en las entradas y salidas de los ductos ayuda al mantenimiento de la calidad del aire y el sistema.

Fuente: Elaboración propia

4.4. Estrategias de mitigación de problemas comunes al sistema

Existen distintas estrategias de mitigación para muchos de los inconvenientes asociados a la construcción y operación de un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Estos problemas tienen que ver con la acumulación de agua de condensación dentro de los ductos y su efecto en la calidad del aire, la contaminación de los ductos debido a una construcción deficiente, la falta de control y el mantenimiento y limpieza de los ductos enterrados (ver Cuadro 28).

Cuadro 28: Problemas comunes y estrategias de mitigación

Problema	Estrategia de mitigación
Acumulación de agua	Caños con pendientes, sumideros, registros o cajas de desagote.
Calidad del aire	Caños con tratamientos antimicrobianos. Estudios de suelo para detección de gas radón.
Falta de control	Sistemas de apertura y cierre de entradas y salidas y control de operación manual o automático de los ventiladores mecánicos
Contaminación de los ductos	Filtros y mallas protectoras en entradas y salidas de aire
Mantenimiento y limpieza	Instalación de mecanismos de limpieza pre-instalados, construcción de registros que permitan el acceso fácil a los ductos, utilización de gas de ozono para la limpieza de los ductos

Fuente: elaboración propia

En resumen, existen diversas pautas de diseño que influyen en el rendimiento de un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Un sistema ICTA diseñado de forma apropiada es capaz de proveer frío y calor suficientes para una vivienda, produciendo ahorro energético y un mayor confort.

El suelo cumple un papel importante en la transferencia de calor y el sistema puede beneficiarse de un mayor rendimiento si el material en contacto con los caños cuenta con buena conductividad térmica.

El material del caño tiene un efecto mínimo en la transferencia de calor entre el suelo y el aire. Su espesor es despreciable comparado con el espesor del suelo, por lo que se recomienda la utilización de caños de PVC debido a su economía y durabilidad.

Un mayor diámetro de los caños resulta en una menor caída o subida de temperatura a una velocidad de aire determinada, pero aumenta su tasa de transferencia de calor. Se recomienda usar múltiples caños de diámetro pequeño, teniendo en cuenta el espacio entre caños.

La profundidad de los caños debe mantenerse entre 2,5 y 3,5 m ya que profundidades mayores elevan los costos de construcción y no presentan un cambio de temperatura apreciable.

La velocidad del caudal de aire también tiene un rol importante, ya que a medida que la velocidad del flujo disminuye, la caída o incremento de temperatura aumenta, pero la capacidad de enfriamiento o calefacción

disminuyen y viceversa. Por ende, el flujo debe ser optimizado para cada caso.

La operación del sistema debe ser programada de manera a darle tiempo suficiente al suelo para recuperar sus características térmicas. Se prefiere la operación intermitente que dé tiempo al suelo de recuperar su estado térmico.

Se reconoce que considerando estas pautas de diseño es posible construir un sistema intercambiador de calor tierra-aire adaptado a una vivienda convencional dentro de los límites de un lote de 12 x 30 m, empleando mano de obra local y métodos de construcción tradicionales.

Sin embargo, uno de los factores más importantes para determinar la aplicabilidad del sistema es el factor económico. Por eso, en el próximo capítulo analizamos los costos asociados a la construcción de un sistema intercambiador de calor tierra-aire.

CAPÍTULO V: COSTOS DE MATERIALES Y MANO DE OBRA ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN PASIVA POR MEDIO DE DUCTOS SUBTERRÁNEOS.

Teniendo en cuenta las pautas de diseño establecidas en el capítulo anterior y utilizando toda la información del marco teórico, se diseñó un sistema intercambiador de calor tierra-aire para climatizar una vivienda de 90 metros cuadrados implantada en un terreno convencional de 12 x 30 m (ver cuadro 29).

Cuadro 29: Pautas de diseño para un intercambiador de calor tierra-aire

Pautas de diseño	Descripción
Disposición de ductos	Vistos en sección transversal, los ductos se colocan en X, aprovechando una misma zanja para colocar 5 ductos distanciados 65 cm entre sus ejes. De esta manera se ahorran costos y superficie de excavación
Circuito	Circuito abierto con la entrada de aire situada al frente de la vivienda. Cada caño de entrada tiene una salida independiente, con un ducto dedicado para cada ambiente
Materialidad	Caños de PVC de 200 mm
Geometría del ducto	Los ductos tienen una superficie lisa y una mínima cantidad de codos y accesorios para disminuir la resistencia del flujo de aire. Los cambios de dirección se dan con curvas, codos y segmentos a 45 grados
Cantidad de ductos	Se plantean cinco ductos independientes. Los ductos 1 y 2 proveen ventilación al living-comedor, mientras que las salidas de los ductos 3, 4 y 5 se encuentran en los dormitorios
Profundidad del ducto	El nivel de profundidad de los ductos varía entre 2,50 y 4 metros. Los ductos 1 y 2 son los más superficiales y los ductos 4 y 5 los más profundos
Flujo de aire	El flujo de aire es controlado por un ventilador axial de velocidad variable ubicado en la entrada del sistema, permitiendo optimizar el tiempo de contacto entre el suelo y el aire, optimizando la transferencia de calor
Control de operación	El control de operación se da a través de un interruptor que controla el ventilador axial y rejillas difusoras dentro de los ambientes que permiten el bloqueo manual del aire de salida, permitiendo la desactivación del sistema y mejorando su rendimiento
Pendiente de desagote	Una pendiente del 1% escurre el agua de condensación hacia los puntos de desagote, donde caños perforados permiten el escurrimiento del agua al terreno para evitar la acumulación de agua
Estrategias complementarias	Cada ambiente posee un extractor en el extremo opuesto al ducto de entrada para facilitar la renovación de aire fresco proveniente del ICTA
Herramientas de diseño	Para el diseño de los ductos se utilizó el software GAEA a modo calcular la longitud y el nivel de profundidad óptimos
Protección de salida y entrada	El ventilador axial, ubicado dentro de una caseta de mampostería con una puerta de inspección, posee una malla metálica y un filtro de aire para impedir la entrada de polvo y elementos extraños

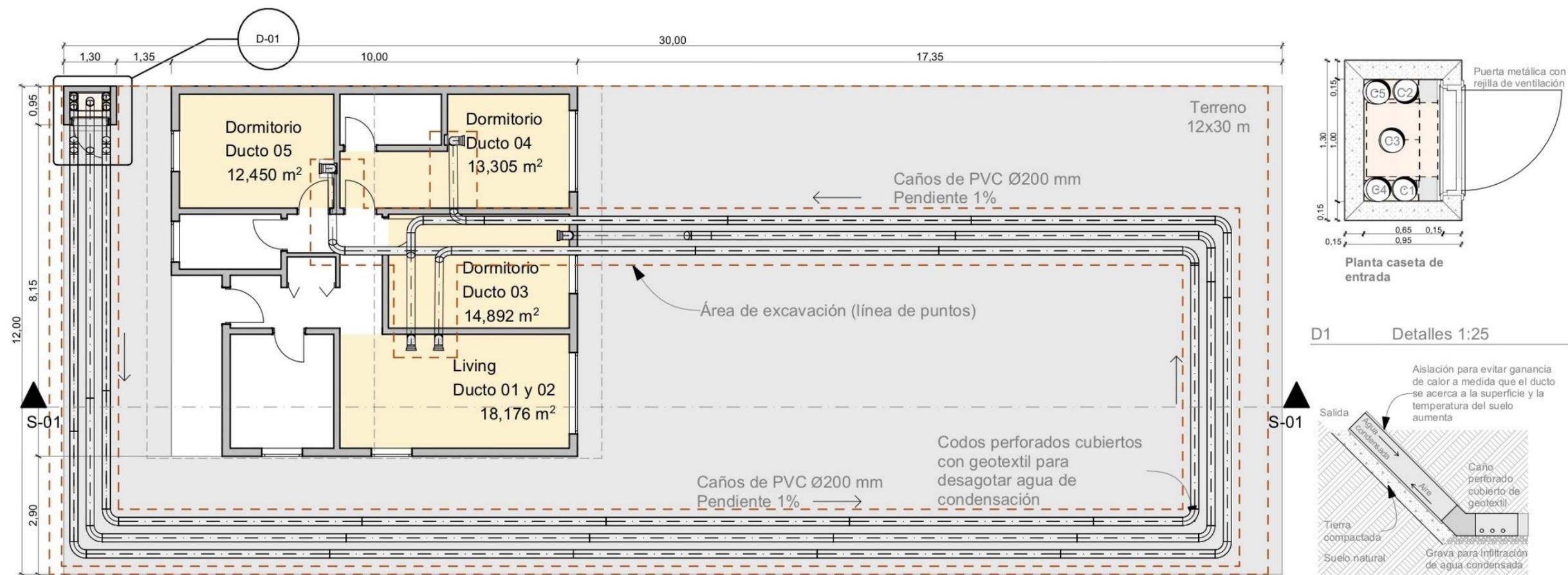
Desagote	Se establecen dos puntos de desagote, uno en el frente y otro en el fondo del terreno. En estos sectores los caños se encuentran perforados cada 10 centímetros en su cara inferior para permitir el escurrimiento de agua al terreno natural
----------	---

Fuente: elaboración propia.

El objetivo de la identificación de estas pautas de diseño es identificar los materiales y mano de obra necesarios para la construcción de un sistema intercambiador de calor tierra-aire, de manera a determinar los costos asociados a la misma.

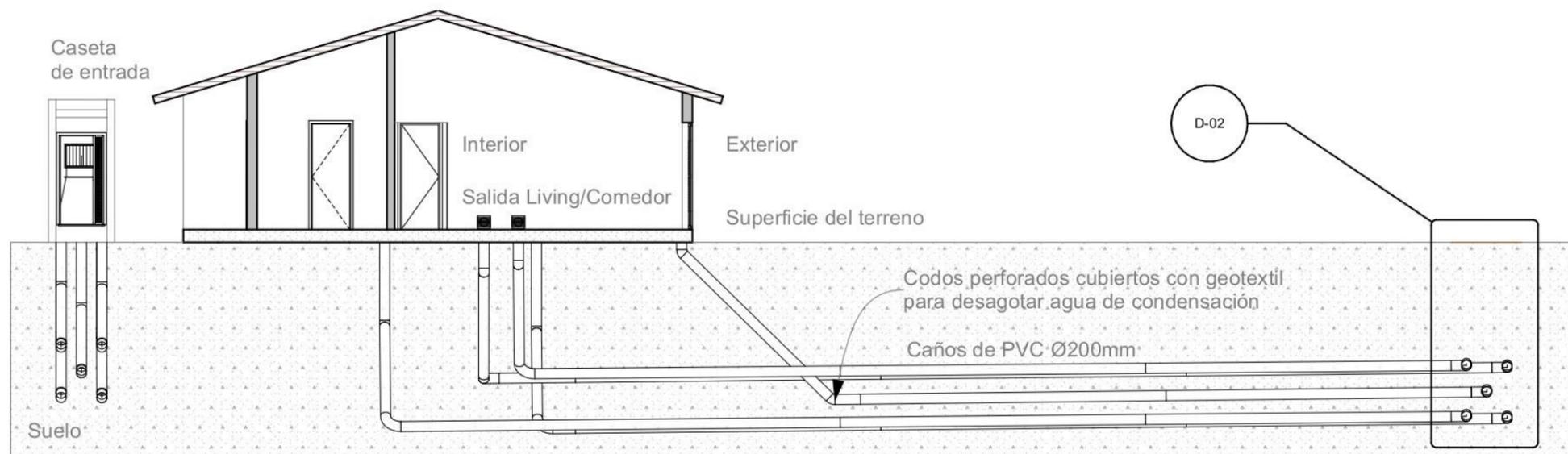
La propuesta de diseño plantea 5 ductos para aclimatar los 4 ambientes más utilizados de la vivienda: living-comedor (ducto 1 y 2), dormitorios (ducto 3, 4 y 5). El sistema de ductos cuenta con un ventilador axial situado en una caseta exterior para impulsar el aire del exterior al interior de los ambientes, asegurando el flujo y la renovación del aire (ver ilustración 32).

Ilustración 33a: Diseño de la propuesta para el análisis económico



Planta Baja

D1 Detalles 1:25



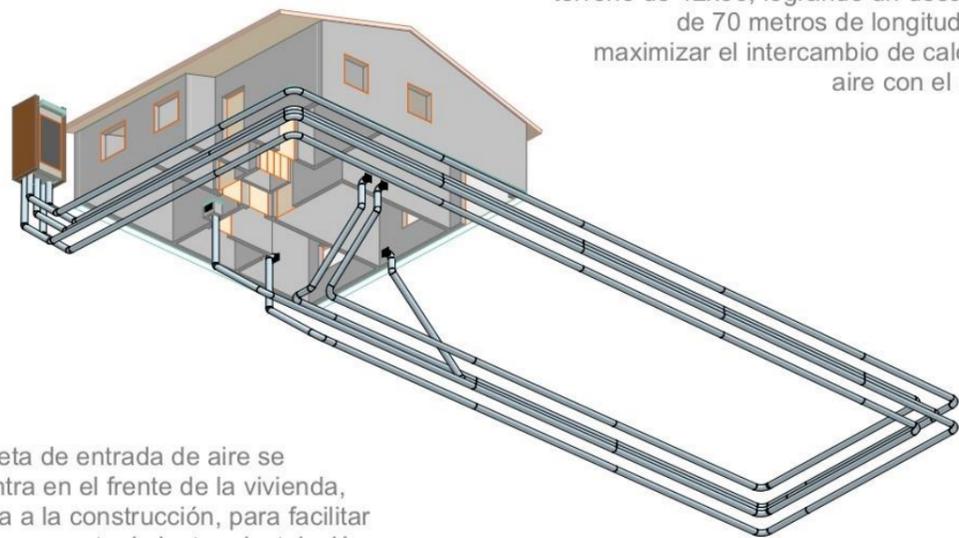
Sección Construcción

S-01

Fuente: elaboración propia

Ilustración 34b: Diseño de la propuesta para el análisis económico

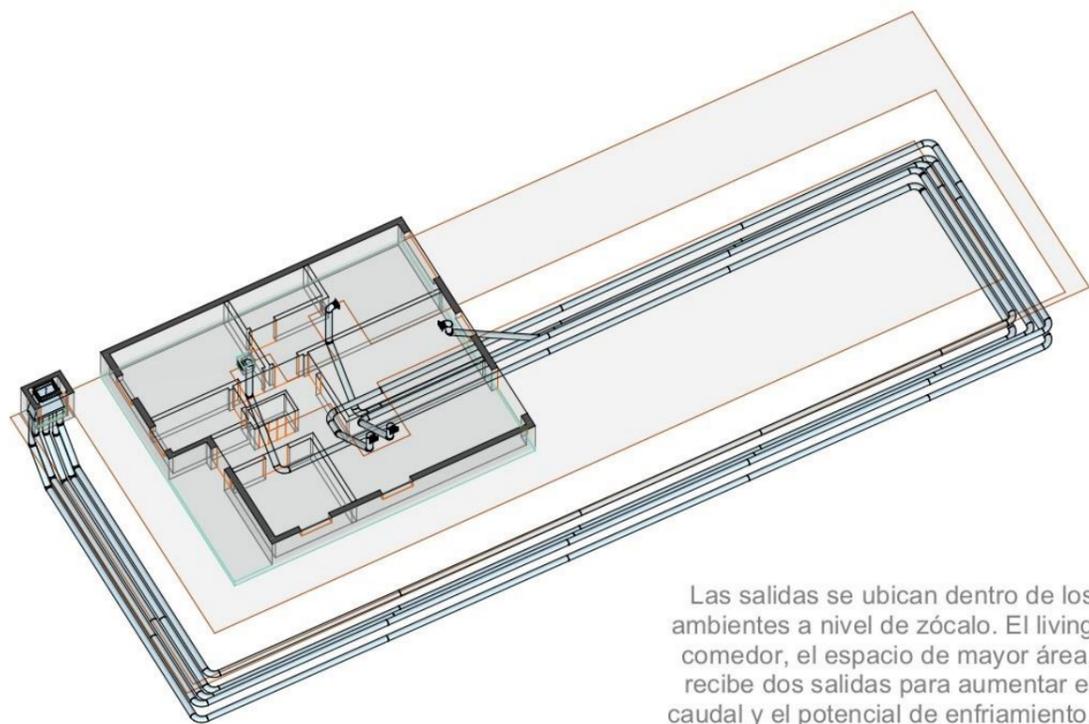
Diseño del trazado de ductos



Los ductos recorren el perímetro del terreno de 12x30, logrando un desarrollo de 70 metros de longitud para maximizar el intercambio de calor del aire con el suelo

La caseta de entrada de aire se encuentra en el frente de la vivienda, cercana a la construcción, para facilitar el acceso, mantenimiento e instalación

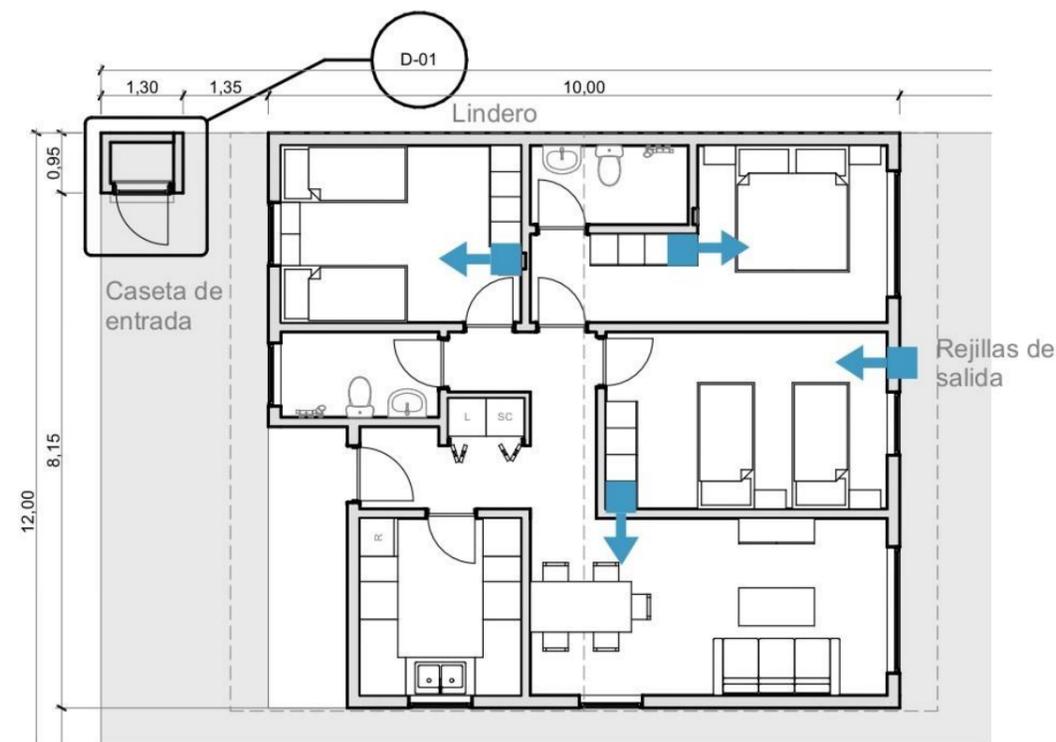
Axonometría inferior



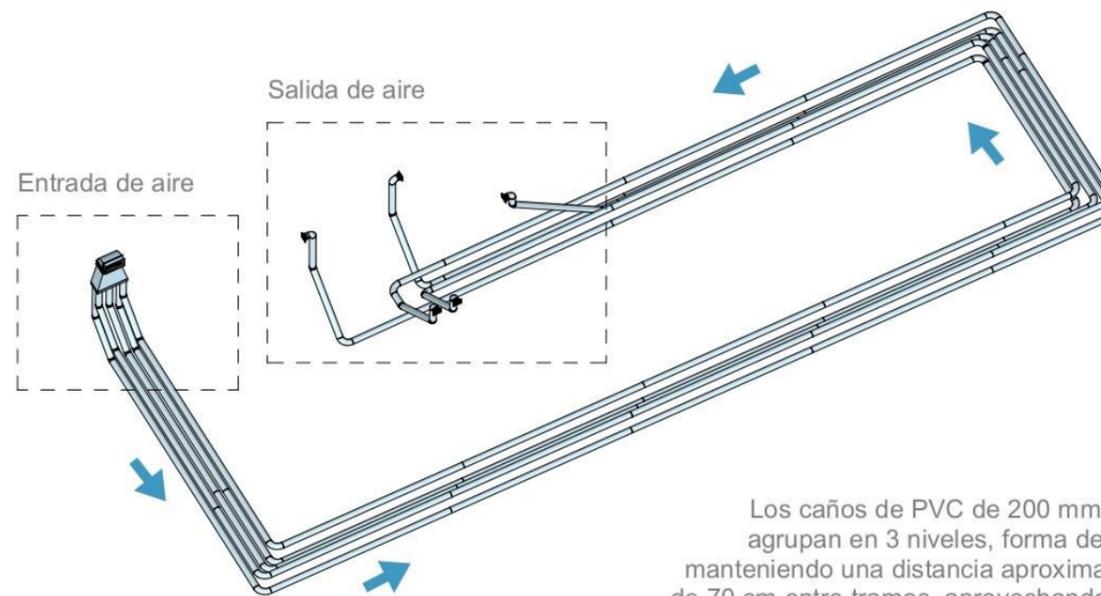
Las salidas se ubican dentro de los ambientes a nivel de zócalo. El living comedor, el espacio de mayor área, recibe dos salidas para aumentar el caudal y el potencial de enfriamiento.

Axonometría superior

Fuente: elaboración propia



0. Planta Baja

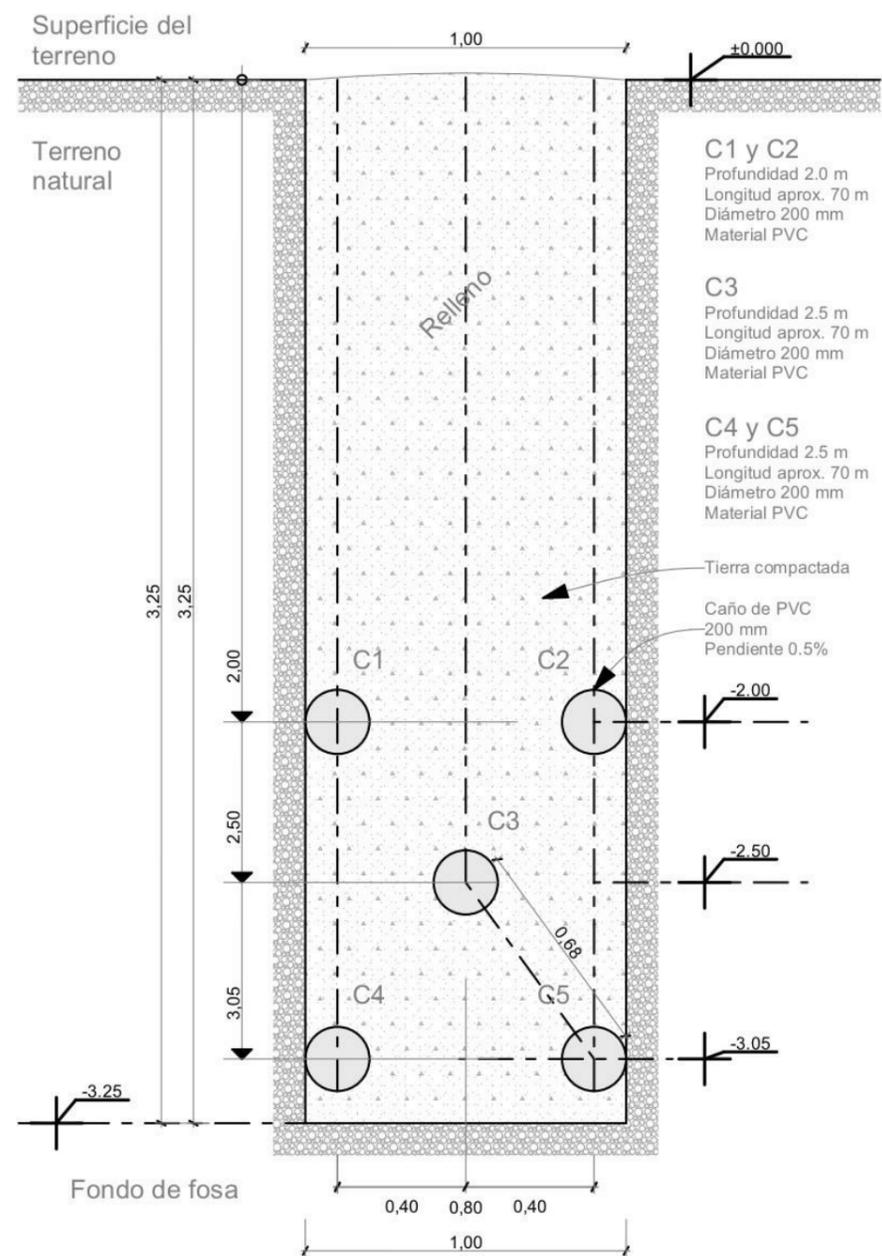


Esquema de ductos

Los caños de PVC de 200 mm se agrupan en 3 niveles, forma de X, manteniendo una distancia aproximada de 70 cm entre tramos, aprovechando el espacio y optimizando la excavación.

Ilustración 35c: Diseño de la propuesta para el análisis económico

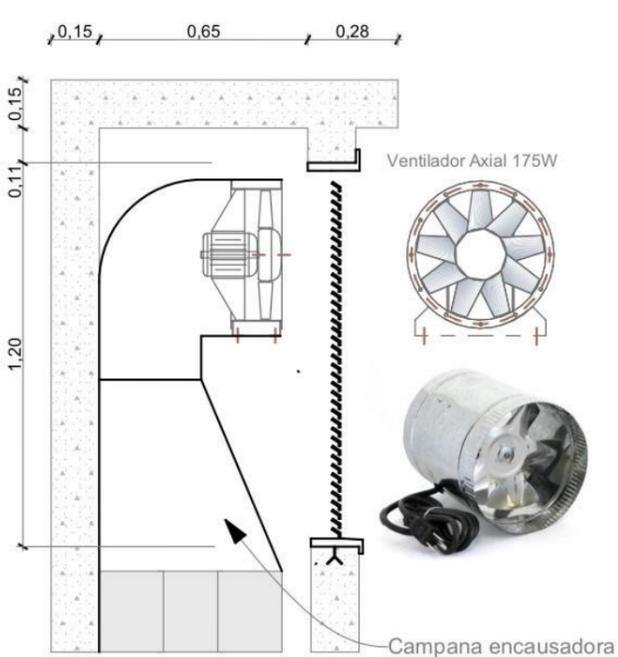
Ubicación de los ductos en la fosa



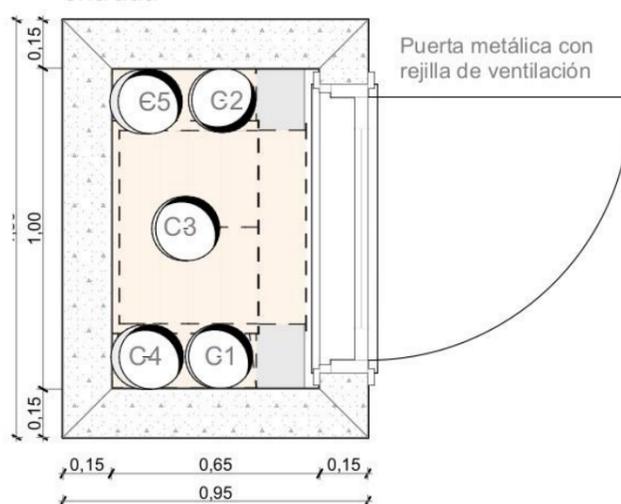
Corte transversal

Los caños se colocan en forma de X para optimizar el volumen y profundidad de excavación, manteniendo una separación uniforme entre ductos, evitando la saturación térmica del suelo y la influencia térmica entre los ductos.

Caseta de entrada e impulsión de aire

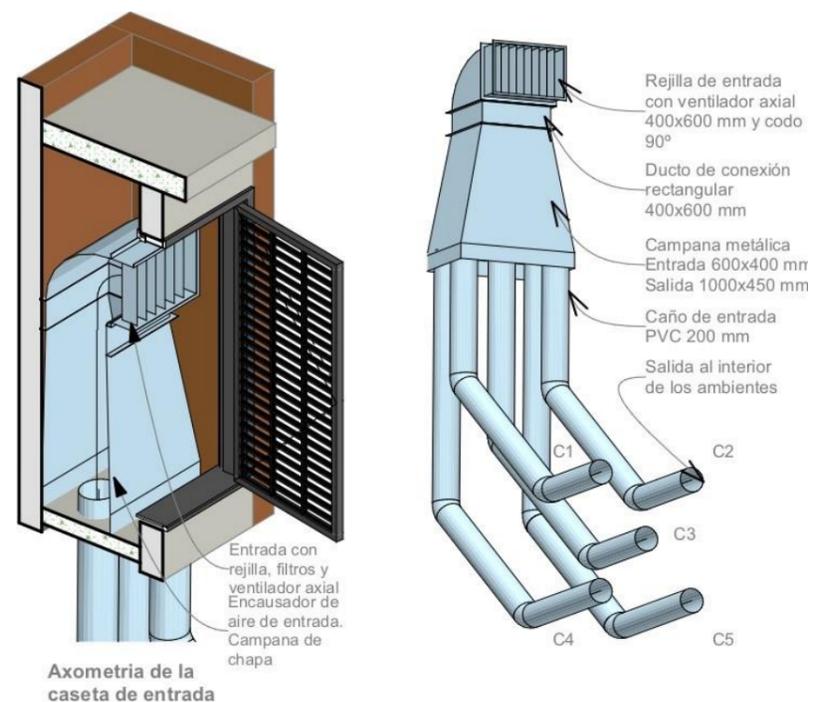


Corte caseta de entrada



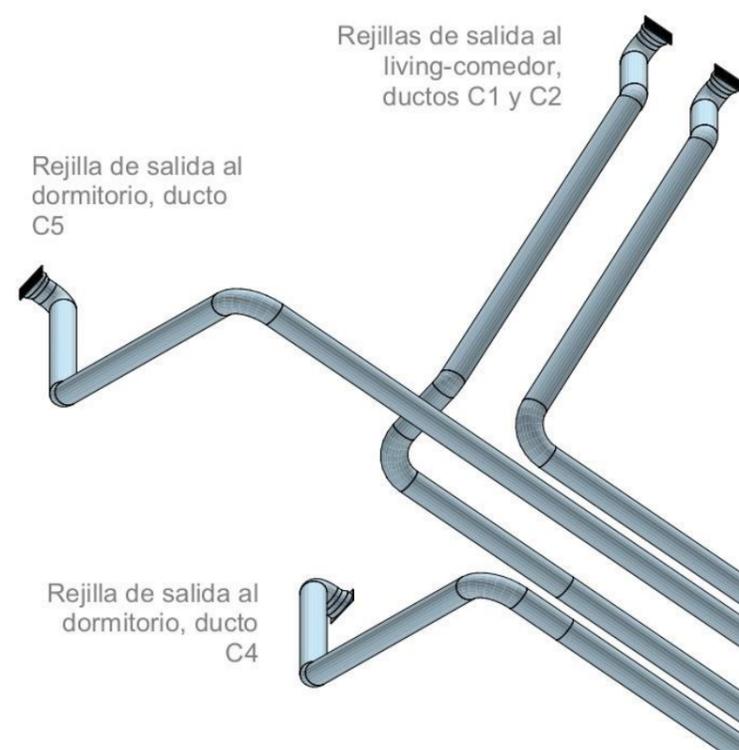
Planta caseta de entrada

La caseta está diseñada para tomar el aire de entrada e impulsarlo a través de los ductos del ICTA. Para ello, cuenta con una campana de chapa que encausa el aire impulsado por el ventilador axial hacia los caños de distribución de aire.



D1 Detalles 1:25

3D-02 Entrada de aire



Salida de aire - Vista inferior

D1 Detalles

D1 Detalles

Fuente: elaboración propia

5.1 Cálculos para la validación de la propuesta

A efectos de validar la efectividad del sistema propuesto y antes de realizar un análisis de costos, se realizaron simulaciones mediante el software alemán GAEA, utilizando los datos del diseño planteado como parámetros de entrada. GAEA se encuentra disponible desde 1998 para asistir en el diseño de intercambiadores de calor tierra-aire para viviendas y pequeñas oficinas. Desde entonces, el software ha sido utilizado extensivamente por arquitectos e ingenieros en la validación de proyectos de intercambiadores de calor tierra-aire, principalmente en Alemania.

El software utiliza modelos analíticos para determinar la temperatura a lo largo del interior de los ductos. Los cálculos se basan en estimaciones de las variaciones de temperatura a lo largo del año a diferentes niveles de profundidad. Los coeficientes que determinan el flujo de calor entre el aire, las paredes de los ductos y el suelo se calculan a partir de los valores de materiales y datos geométricos.

El uso del programa permite calcular las temperaturas mínimas y máximas de salida de los ductos en base a la geometría del ducto, el material, el tipo de suelo y la media anual de temperatura. De esta forma podemos validar de forma analítica el desempeño del diseño antes de cotizar y construir un sistema ICTA.

Cuadro 30: Datos para el cálculo

Características geométricas del ducto	
Cantidad de ductos	5
Longitud	70 metros
Diámetro de caños	200 mm
Suelo	
Tipo de suelo	Arenoso
Densidad	1650 kg/m ³
Capacidad térmica	2.85 kJ
Conductividad térmica	2.3 W/m
Datos climáticos	
Valor máximo mensual	33.5 C
Temperatura baja promedio	23.1 C
Mes de máxima temperatura	Enero

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos del cuadro anterior, se realizaron simulaciones para los distintos ductos (C1, C2, C4 y C5), ubicados a diferentes niveles de profundidad. Para poder comparar los efectos de la profundidad de los ductos en la temperatura de salida, se consideró una misma longitud para todos los caños.

Cuadro 31: Ductos y ambientes

Ducto	Ambiente
C1	Living-Comedor
C2	Living-Comedor
C3	Dormitorio
C4	Dormitorio
C5	Dormitorio

Fuente: elaboración propia.

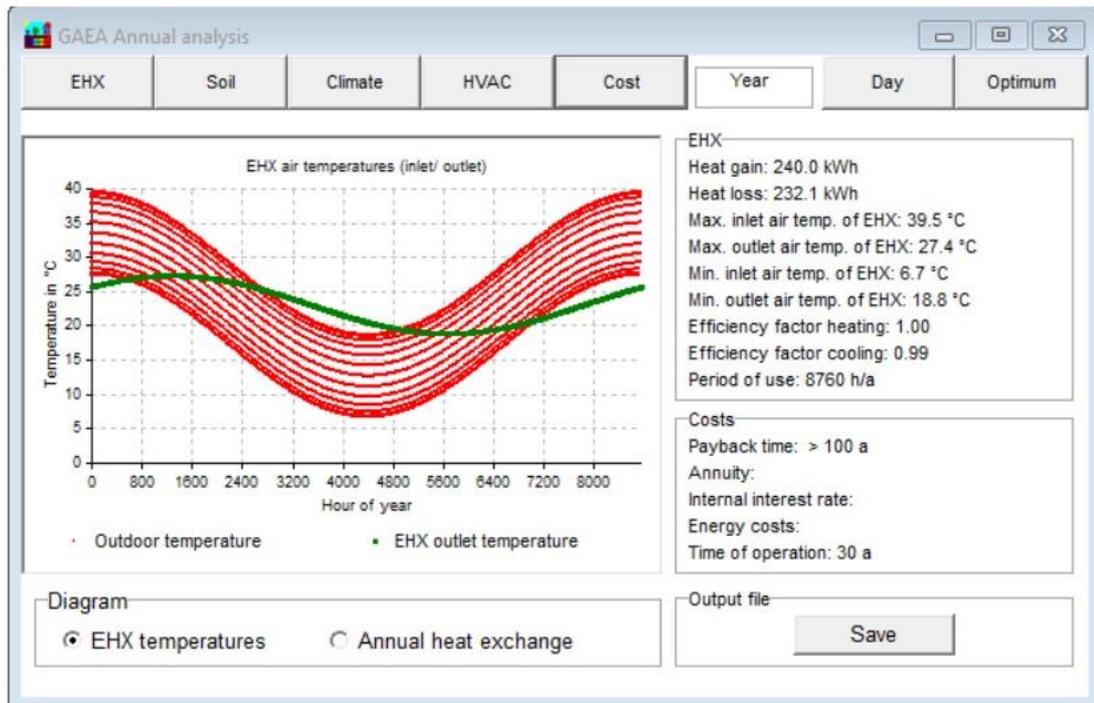
Los ductos C1 y C2, ubicados a un nivel de profundidad promedio de 2 metro y que en conjunto proveen de aire al living-comedor, muestran una temperatura de salida máxima de 27.4 C según simulación (ver Cuadro 32). Esto corresponde a 12.1 C grados por debajo de la temperatura de entrada en el periodo más caluroso.

Cuadro 32: Cálculo de los ductos C1 y C2

Parámetro	Valor calculado
Profundidad	2 metros
Temperatura máxima en la entrada	39.5 C
Temperatura máxima en la salida	27.4 C
Temperatura mínima en la entrada	6.7 C
Temperatura mínima en la salida	18.8 C
Diferencia de temperatura	12.1 C

Fuente: elaboración propia.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas



Fuente: elaboración propia, software GAEA.

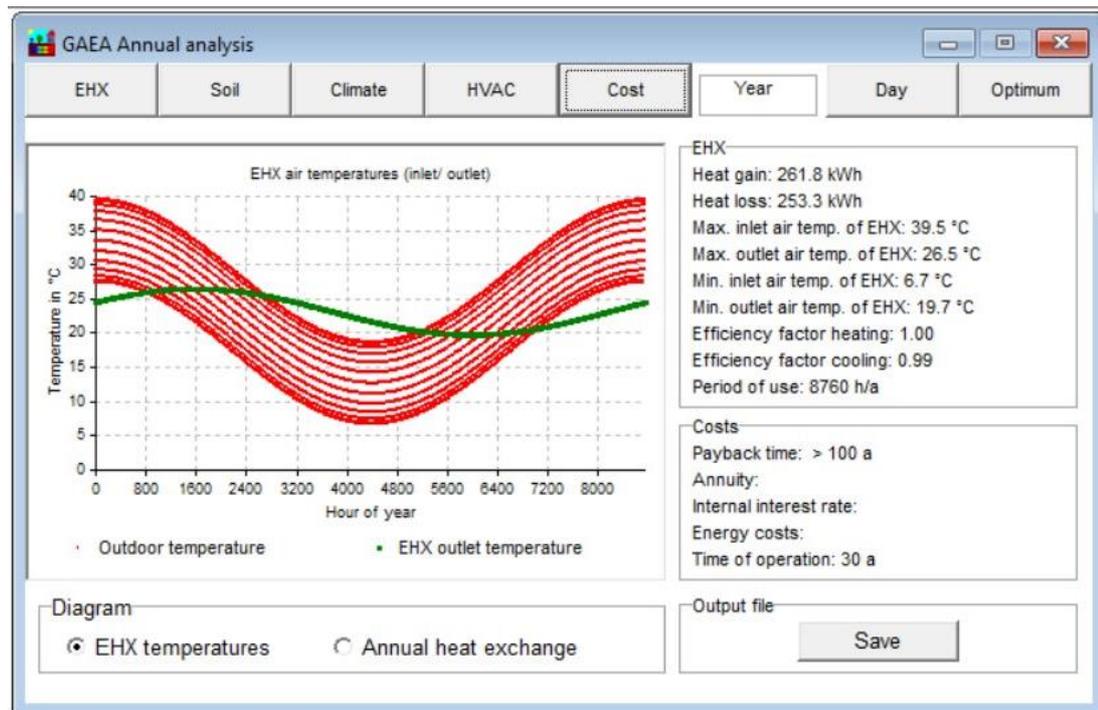
El ducto C3, ubicado a un nivel de profundidad promedio de 2.5 metros y que provee de aire al dormitorio 3, muestra una temperatura de salida máxima de 26.5 C, 13 C grados por debajo de la temperatura de entrada en el periodo más caluroso (ver Cuadro 33)

Cuadro 33: Cálculo del ducto C3

Parámetro	Valor calculado
Profundidad	2.5 metros
Temperatura máxima en la entrada	39.5 C
Temperatura máxima en la salida	26.5 C
Temperatura mínima en la entrada	6.7 C
Temperatura mínima en la salida	19.7 C
Diferencia de temperatura	13.0 C

Fuente: elaboración propia.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas



Fuente: elaboración propia, software GAEA.

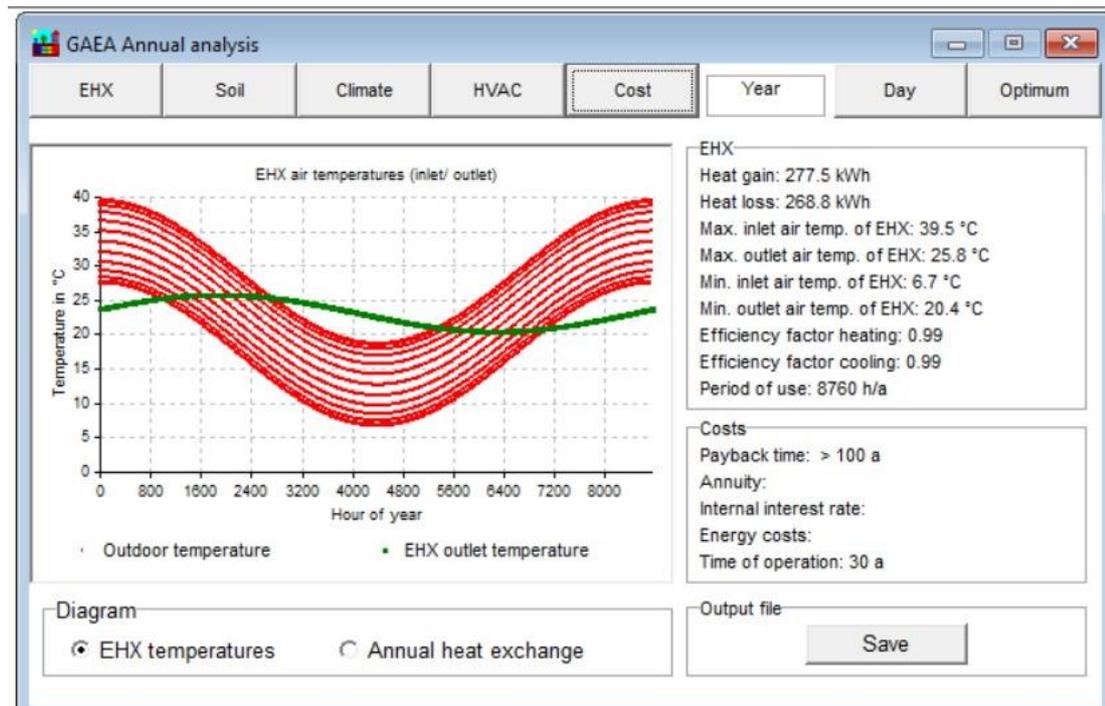
Los ductos C4 y C5, se encuentran a un nivel de profundidad promedio de 3 metros y proveen de aire al dormitorio 1 y al dormitorio 2 de manera independiente. Luego del cálculo, ambos ductos muestran una temperatura de salida máxima de 25.8 C, lo que significa una diferencia de 13.7 C por debajo de la temperatura de entrada en el periodo más caluroso del año (ver Cuadro 34).

Cuadro 34: Cálculo de los ductos C4 y C5

Parámetro	Valor calculado
Profundidad	3 metros
Temperatura máxima en la entrada	39.5 C
Temperatura máxima en la salida	25.8 C
Temperatura mínima en la entrada	6.7 C
Temperatura mínima en la salida	20.4 C
Diferencia de temperatura	13.7 C

Fuente: elaboración propia.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas



Fuente: elaboración propia, software GAEA.

Es posible comparar los resultados de cada simulación para obtener información sobre el comportamiento del sistema a distintos niveles de profundidad y verificar la información analizada en el Marco Teórico.

Cuadro 35: Comparación de las temperaturas de salida calculadas

Parámetro	Profundidad / °C		
	2 m	2,5 m	3 m
Temperatura de salida			
Máxima	27.4 C	26.5 C	25.8 C
Mínima	18.8 C	19.7 C	20.4 C
Diferencia entrada/salida	12.1 C	13.0 C	13.7 C

Fuente: Elaboración propia.

Observando el cuadro comparativo (ver Cuadro 35) se aprecia que la transferencia de calor a niveles de profundidad superiores a los 2 metros no aumenta de manera considerable. Así mismo, a los 3 metros de profundidad se obtiene la mayor diferencia de temperatura entre el aire de entrada y el aire de salida.

Vale destacar que, en todos los casos, la curva trazada por el registro de la temperatura de salida la permanece muy próxima a la media anual de temperatura durante todo el año. Por último, todos los cálculos concuerdan

con la información analizada y las predicciones establecidas en el Marco Teórico.

5.2 Análisis económico de la construcción del sistema ICTA

Una de las características principales de los sistemas pasivos son su bajo costo de mantenimiento, pero elevado costo inicial y los requerimientos de espacio con relación a los sistemas tradicionales de aire acondicionado.

Con el fin de determinar los costos y que el estudio sirva de referencia para otras propuestas, se realizó un análisis de costos por metro lineal de ductos. El análisis por metro lineal de ductos permite inferir los costos para la construcción de sistemas de cualquier longitud. Por otra parte, se individualizaron los rubros de excavación y caseta de impulsión de aire para que no influyan sobre el análisis de costo lineal.

Sin embargo, antes de entrar a analizar los costos de instalación y mantenimiento del sistema ICTA, es necesario entender los costos relacionados al a instalación de un sistema de aire acondicionado convencional tipo Split de forma a poner la inversión en perspectiva y comparar las ventajas y desventajas económicas de ambos sistemas.

5.2.1 Costo del sistema de aire acondicionado convencional tipo split

Antes de evaluar la inversión de un sistema ICTA es importante entender los costos asociados a la instalación de un sistema convencional equivalente. Para eso se realizó un análisis de los costos relacionados a la instalación, operación y mantenimiento de un sistema de acondicionadores de aire tipo Split para la vivienda de la propuesta.

Este sistema consiste en 3 equipos de 12.000 BTU para los 3 dormitorios y un equipo de 18.000 BTU para el espacio de living-comedor.

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

Cuadro 36: Costos de instalación de un sistema tipo split

Descripción	Un	Cant	Precio Unitario	Subtotal
Sistema de desagüe de evaporadores	ml	12	15.000	180.000
Circuito y boca de alimentación para aire acondicionado	Un	4	290.000	1.160.000
Equipo acondicionador de aire tipo split 12000 BTU	Un	3	2.200.000	6.600.000
Equipo acondicionador de aire tipo split 18000 BTU	Un	1	3.600.000	3.600.000
Instalación de aire acondicionado	Un	4	350.000	1.400.000
Total Gs.				12.940.000

Fuente: elaboración propia.

Para calcular los costos de operación se estimó el consumo energético de los equipos de aire durante un periodo de un mes, considerando el uso máximo de 8 horas diarias a un costo de Gs. 436 por Kwh (tarifa actual de la ANDE).

Cuadro 37: Costos operación de un sistema tipo Split (Gs.) por equipo

Descripción	Watts	kWh	Horas/ día	Días/ mes	kWh/ mes	Gs/ Kwh	Costo mensual
1x AC Tipo Split 12000 BTU	1600	1,6	8	30	384	436	167.424
1x AC Tipo Split 18000 BTU	2150	2,15	8	30	516	436	224.976

Fuente: elaboración propia.

Para una vivienda como la de la propuesta, equipada con cuatro equipos de aire acondicionado tipo split, uno para cada ambiente, el costo anual de operación aproximado es de Gs. 8.726.976.

Cuadro 38: Costo total de operación de un sistema tipo split

Descripción	Cant	Costo Mensual	Meses	Subtotal
AC Tipo Split 12000 BTU	3	167.424	12	6.027.264
AC Tipo Split 18000 BTU	1	224.976	12	2.699.712
Total costo energético anual Gs.				8.726.976

Fuente: elaboración propia.

Por último, para determinar los costos de mantenimiento se consideró un mantenimiento completo anual de cada equipo, consistente en limpieza de

Propuesta de diseño de ductos subterráneos como sistema de climatización pasiva para el acondicionamiento de viviendas

filtros, limpieza de las unidades evaporadora, limpieza de los compresores compresor, medición de presiones y carga de gas.

Cuadro 39: Costos de mantenimiento de un sistema tipo split

Descripción	Un	Cant	Precio Unitario	Subtotal
Limpieza de filtros, limpieza de unidad evaporadora, limpieza de compresor, medición de presiones, carga de gas	Un	4	300.000	1.200.000
			Total Gs.	1.200.000

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta estos costos podemos tener una línea base sobre la cual evaluar la inversión requerida por un sistema ICTA para satisfacer las mismas necesidades.

5.2.2 Costo del sistema ICTA

El sistema de entrada consiste en una caseta de mampostería de ladrillo y materiales tradicionales de dimensiones 1.00 x 0.60 m que contiene un ducto metálico conectado al ventilador axial. La caseta tiene una puerta metálica batiente y una llave interruptora de corriente conectada al tablero principal.

Cuadro 40: Costos de sistema de entrada de aire

Descripción	Un	Cant	Precio Unitario	Subtotal
Toma de aire exterior				
Caseta de ladrillo común revocado, 1,30 x 0,75 x 2,35	Gl	1	1.450.000	1.450.000
Encausador de aire de chapa número 26	Un	1	450.000	450.000
Puerta tipo persiana de chapa número 28	Un	1	300.000	300.000
Conexión al tablero	Gl	1	250.000	250.000
Llave de dos puntos	Un	1	270.000	270.000
Ventilador 175 watts, 2800 RPM, 220V diámetro 400 mm	Un	1	950.000	950.000
			Total Gs.	3.670.000

Fuente: elaboración propia.

5.2.2.1 Costo de excavación y relleno

Para la excavación se contempla el alquiler de una retroexcavadora y la compra de arena lavada para las capas de asiento.

Cuadro 41: Costos de excavación

Descripción	Un	Cant	Precio Unitario	Subtotal
Movimiento de suelo				
Replanteo	ml	90	5.000	450.000
Excavación manual	m3	270	40.000	10.800.000
Relleno y compactación (solo mano de obra)	m3	270	35.000	9.450.000
			Total Gs.	20.700.000

Fuente: elaboración propia.

5.2.2.2 Costo de instalación de los ductos

Para la construcción de los ductos se contempla el empleo caños de PVC de 200 mm con un desarrollo total de 358 metros lineales distribuidos en 5 ductos, con sus respectivos accesorios, colocados y enterrados a una profundidad máxima de 3 metros.

Cuadro 42: Costos de instalación de ductos

Descripción	Un	Cant	Precio Unitario	Subtotal
Instalacion de cañeria de PVC 200 mm (mano de obra)	ml	358	25.000	8.950.000
Caño de PVC 200 mm	ml	358	45.000	16.110.000
Adhesivo y anillos de sellado	gl	1	290.000	290.000
Codos y accesorios	gl	1	473.000	473.000
Colocacion de rejillas de salida	Un	5	65.000	325.000
			Total Gs.	26.148.000

Fuente: elaboración propia.

5.2.2.3 Costo de operación y mantenimiento

El costo de operación del sistema es muy bajo con relación a un sistema de aire acondicionado convencional tipo Split. Analizando el consumo de un ventilador de 175 watts operando durante 8 horas al día al mes y multiplicándolo por el costo de energía podemos determinar el costo de operación.

Cuadro 43: Costos de operación del sistema ICTA

Descripción	kWh	Horas/día	Días/mes	kWh/mes	Gs/Kwh	Costo mensual
Ventilador Axial 175 watts, diámetro 400 mm	0,175	8	30	42	436	18.312
Total Gs.						18.312

Fuente: elaboración propia.

Para determinar los costos de mantenimiento se contemplaron dos mantenimientos anuales consistentes en revisión de ventilador, con su correspondiente limpieza y engrasado, además de la limpieza de los filtros del sistema.

Cuadro 44: Costos de operación y mantenimiento

Descripción	kWh	Horas/día	Días/mes	kWh/mes	Gs/Kwh	Costo mensual
Ventilador Axial 175 watts, diámetro 400 mm	0,175	8	30	42	436	18.312
Total Gs.						18.312

Luego de analizar los costos de construcción, se concluye que el mayor costo corresponde al rubro de excavación. El mismo también presenta un potencial de sobrecosto en función al tipo de suelo y los requerimientos específicos del plan de excavación. Este análisis no contempla obras de contención de suelo ni otras medidas preventivas ante el desmoronamiento que deberán ser contempladas para cada caso particular.

Cuadro 45: Comparativo de inversión (Gs.)

Descripción	Split	ICTA
Instalación del sistema para una casa de 3 dormitorios	12.940.000	50.518.000
Operación y mantenimiento anual del sistema	9.926.976	719.744
Proyección de inversión en 4 años de operación	52.647.904	53.396.976

Por otro lado, se aprecia un ahorro potencial importante en la operación y mantenimiento frente a la utilización de un sistema convencional.

CONCLUSIÓN

Los sistemas pasivos basados en tecnologías alternativas pueden reducir la demanda energética y de acondicionamiento de aire en viviendas. El sistema intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) es una alternativa válida, local, sostenible y de bajo costo de operación para aumentar el confort térmico, reducir el consumo de energía, los costos de operación y la huella de carbono durante el ciclo de vida del edificio. No obstante, siguen utilizándose mayormente tecnologías de climatización activa. De esta forma se plantea el objetivo general de elaborar una propuesta de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos para el acondicionamiento de viviendas a fin de indagar su factibilidad de implementación. Es por ello que se ha estudiado un marco teórico sustentado en las tecnologías alternativas para la construcción y el acondicionamiento pasivo mediante ductos subterráneos.

Se han logrado identificar casos de aplicación de climatización pasiva, lo que ha permitido determinar las ventajas y desventajas de los sistemas planteados; estableciendo pautas que optimicen el diseño y construcción del sistema, incluyendo costo de materiales y mano de obra para asegurar el cuidado del medioambiente considerando el confort térmico de los usuarios.

Esta respuesta se sustenta en la resolución y alcance de los objetivos específicos donde la experiencia local demuestra que el sistema intercambiador tierra-aire es una tecnología efectiva y apropiada a nuestro contexto. Existen numerosas ventajas con respecto al sistema de acondicionamiento tradicional tipo Split si se aplican los parámetros de diseño apropiados, y aunque el costo inicial es mayor de un sistema intercambiador de calor tierra-aire, hay un gran potencial de ahorro a largo plazo.

Tomando en cuenta este paso, se han identificado los casos de aplicación de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos en Paraguay. Mediante este análisis, se concluye que existen diversas maneras de diseñar y construir un sistema intercambiador de calor tierra-aire. Los casos estudiados demuestran que la disminución de temperatura a la salida

del sistema es considerable y que el sistema es efectivo durante periodos de calor y de frío.

Por lo tanto, se han determinado las ventajas y desventajas de los sistemas planteados en los casos identificados en el objetivo anterior para concluir que los mayores obstáculos para la aceptación del sistema ICTA están relacionados a la calidad del aire, el costo inicial, el área requerida para su construcción y el desconocimiento sobre los beneficios de utilizar este sistema. Sus mayores ventajas radican en la apropiación, simplicidad y descentralización de su tecnología, además del ahorro en costos de operación y bajo impacto en el medioambiente.

Con lo mencionado anteriormente, se han establecido pautas que optimizan el diseño y construcción de un sistema de climatización de ductos subterráneos para el acondicionamiento pasivo de viviendas. Es así como se ha concluido que existen consideraciones de planificación y parámetros de diseño que determinan el desempeño del sistema y su factibilidad constructiva. Entender cómo influye cada uno de ellos es clave para diseñar y construir un sistema intercambiador de calor tierra-aire apropiado y eficiente.

En base a estos parámetros se han determinado los costos de materiales y mano de obra asociados a la construcción del sistema de climatización pasiva por medio de ductos subterráneos concluyendo que el costo inicial es elevado con respecto al sistema tradicional de acondicionador de aire tipo Split debido al volumen de excavación. Sin embargo, existe un potencial de ahorro a largo plazo gracias al bajo costo de operación. La mano de obra no especializada, su bajo consumo, la naturaleza elemental de los materiales asociados a la construcción de los ductos y su capacidad de poder operar fuera de la grilla eléctrica son puntos para considerar al momento de evaluar la economía del sistema.

Esta investigación abre camino hacia un futuro posible de tecnologías apropiadas para la climatización pasiva, presentando casos de aplicación local, demostrando las ventajas y estableciendo las mejores prácticas de manera a aprovechar la energía latente del suelo para promover el confort humano sin degradar el medioambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, K. K., Agrawal, G. Das, Misra, R., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2018). A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger. In *Energy and Buildings* (Vol. 176). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>
- Agrawal, P. C. (1989). A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. *Solar & Wind Technology*, 6(5), 557–567. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(89\)90091-X](https://doi.org/10.1016/0741-983X(89)90091-X)
- Ahmed, A. S. F., Khan, K. M. M. K., Maung Than Oo, A. A., Maung Than Oo, A. A., & Rasul, R. M. G. (2014). Selection of suitable passive cooling strategy for a subtropical climate. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0014-7>
- Ahmed, S. F., Khan, M. M. K., Rasul, M. G., Amanullah, M. T. O., & Hassan, N. M. S. (2014). Comparison of earth pipe cooling performance between two different piping systems. *Energy Procedia*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.237>
- Almusaed, A. (2011). *Biophilic and Bioclimatic Architecture*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>
- Altan, H., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K. A., & Deep, A. (2016). Passive Design. *ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes*, 209–236. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31967-4_8
- Alves, A. B. M., & Schmid, A. L. (2015). Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions. *Energy and Buildings*, 90, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.025>
- Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., & Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 89). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>
- Buydens, S. (2016). *DIY: How to Make Cheap Air Conditioning Earth Tubes: Do It Yourself Homemade Air Conditioner - Non-Electric Sustainable Design - Geothermal Energy - Passive Heating and Cooling*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Cabezas, A. M. (2012). *Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real “Casa Pomaret.”* Universitat Politècnica de Catalunya.

- Chiesa, G. (2017). Climate-potential of earth-To-Air heat exchangers. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.300>
- Chiesa, G. (2018). EAHX – Earth-to-air heat exchanger: Simplified method and KPI for early building design phases. *Building and Environment*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.014>
- Choudhury, T., & Misra, A. K. (2014). Minimizing changing climate impact on buildings using easily and economically feasible earth to air heat exchanger technique. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(7), 947–954. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9453-3>
- Cohenca, Delia; Bordas, M. S. (2013). Caracterización de las propiedades térmicas del suelo. *ASADES, 1* (Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente), 43–52.
- Cohenca, Delia; Bordas, Mariano; Schwartzman, David; Jara, M. (2013). *Diseño, implementación y monitoreo de intercambiadores Geotérmicos*.
- Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Magadzire, C. L., & Yuan, K. (2011). Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.018>
- Dickinson, D. (1974). *Alternative Technology: And the Politics Of Technical Change*. Fontana.
- Elliott, D. (2016). The Alternative Technology Movement: An Early Green Radical Challenge. *Science as Culture*, 25(3), 386–399. <https://doi.org/10.1080/09505431.2016.1164400>
- Gallo, C. (1996). Passive cooling as design methodology: some examples from the past to the present. *Renewable Energy*, 8(1–4 pt 1), 309–314. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88867-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88867-7)
- Geetha, N. B., & Velraj, R. (2012). Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(2), 913–946.
- Givoni, B. (1979). Passive cooling of buildings by natural energies. *Energy and Buildings*, 2(4), 279–285. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(79\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0378-7788(79)90039-2)
- Givoni, B. (1991). Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy and Buildings*, 17(3), 177–199. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90106-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90106-D)
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)

- Givoni, B. (2011). Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy*, 85(8), 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Gupta, N., & Tiwari, G. N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.129>
- Hatamipour, M. S., & Abedi, A. (2008). Passive cooling systems in buildings: Some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.018>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. (2014). Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. *Applied Energy*, 119, 476–487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.042>
- INTN Instituto Nacional de Tecnología Normalización y Metrología. (2015). *CTN 55 Construcción Sostenible [CTN 55 Sustainable Construction]*.
- Jacovides, C. P., & Mihalakakou, G. (1995). An underground pipesystem as an energy source for cooling/heating purposes. *Renewable Energy*, 6(8), 893–900. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148195001017>
- Jafarian, S. M., Jaafarian, S. M., Haseli, P., & Taheri, M. (2010). Performance analysis of a passive cooling system using underground channel (Naghb). *Energy and Buildings*, 42(5), 559–562. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.025>
- Kaushal, M. (2017). Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. In *Energy and Buildings* (Vol. 139). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.024>
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40(4), 486–494. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003>
- Liu, J., Yu, Z., Liu, Z., Qin, D., Zhou, J., & Zhang, G. (2017). Performance Analysis of Earth-air Heat Exchangers in Hot Summer and Cold Winter Areas. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.342>
- Maerefat, M., & Haghighi, A. P. (2010). Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy*, 35(10), 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.003>
- Mathur, A., Priyam, Mathur, S., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2017). Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes. *Renewable Energy*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.001>

- Muehleisen, R. T. (2012). Simple Design Tools for Earth-Air Heat Exchangers. *IBPSA-USA Journal*, 5(1), 723–730. <https://doi.org/10.13140/2.1.2854.5607>
- Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 28, pp. 107–116). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.057>
- Samani, P., Leal, V., Mendes, A., & Correia, N. (2016). Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building. *Energy and Buildings*, 120, 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.055>
- Samuel, D. G. L., Nagendra, S. M. S., & Maiya, M. P. (2013). Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review. *Building and Environment*, 66, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.016>
- Santamouris, M. (2006). *Ventilation Information. Use of Earth to Air Heat Exchangers for Cooling. The Use of the Ground as a Heat Sink. June*, 1–8.
- Santamouris, M., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., & Kolokotsa, D. (2007). Recent progress on passive cooling techniques. Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. *Energy and Buildings*, 39(7), 859–866. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.008>
- Santamouris, M. (2007). *Advances in Passive Cooling* (M Santamouris (ed.)). Routledge. <http://www.tandfebooks.com/isbn/9781849773966>
- Santamouris, M. (2005). *Passive Cooling of Buildings*.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. In *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Sharan, G., & Jadhav, R. (2003). Performance of single pass earth tube heat exchanger: An experimental study. *Indian Institute of Management Ahmedabad, iima*. <http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2003-01-07GirjaSharan.pdf>
- Silva, J. C. da. (2007). Preheating of supply air through an earth to air heat exchanger coupled with a solar chimney. *Building Simulation*.
- Singh, R., Sawhney, R. L., Lazarus, I. J., & Kishore, V. V. N. (2018). Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.058>

- Smith, A. (2005). The Alternative Technology Movement: An Analysis of its Framing and Negotiation of Technology Development. *Human Ecology Review*, 12(2), 106–119.
- Smith, A. (2016). Alternative technology niches and sustainable development. *Innovation: Management, Policy and Practice*, 18(4), 468–484. <https://doi.org/10.1080/14479338.2016.1265047>
- Soni, S. K., Pandey, M., & Bartaria, V. N. (2015). Ground coupled heat exchangers: A review and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.014>
- Soni, S. K., Pandey, M., & Bartaria, V. N. (2016). Hybrid ground coupled heat exchanger systems for space heating/cooling applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 724–738. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.125>
- Thevenard, D. (2007). *Bibliographic Search on the Potential of Earth Tubes*.
- Tiwari, G. N., Upadhyay, M., & Rai, S. N. (1994). A comparison of passive cooling techniques. *Building and Environment*, 29(1), 21–31. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)90049-3)
- Uddin, K., Miyazaki, T., Saha, B. B., & Koyama, S. (2015). Alternative technology for cooling. *2015 International Conference on Green Energy and Technology, ICGET 2015*. <https://doi.org/10.1109/ICGET.2015.7315114>
- Uddin, M. S., Ahmed, R., & Rahman, M. (2016). Performance evaluation and life cycle analysis of earth to air heat exchanger in a developing country. *Energy and Buildings*, 128, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.088>
- Vaz, J., Sattler, M. A., Brum, R. D. S., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2014). An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). *Energy and Buildings*, 72, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.009>
- Zaki, A. K., Amjad, A., & Almssad, A. (2007). Cooling by underground earth tubes. *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete Island, Greece, 1(September)*, 517–520.
- Zukowski, M., Sadowska, B., & Sarosiek, W. (2011). *Assessment of the cooling potential of an earth-tube heat exchanger in residential buildings ENVIRONMENTAL ENGINEERING ASSESSMENT OF THE COOLING POTENTIAL OF AN EARTH-TUBE HEAT EXCHANGER IN RESIDENTIAL BUILDINGS*. <http://enviro.vgtu.lt>