

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Evaluación del potencial de aplicación de soluciones de enfriamiento evaporativo para la reducción de la demanda de refrigeración en edificios en India

Autor: Angel Ruiz Cruceira

Tutor: Jose Manuel Salmerón Lissén

Departamento de Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



RESUMEN

En este documento se creará una guía para obtener mapas de aplicabilidad de sistemas PDEC a través del programa ArcMap de la Compañía ARCGIS. El objetivo es que cualquier usuario pueda conocer usando el mapa si el sistema PDEC es una solución acertada en la zona donde se quiere implantar dependiendo de los valores que se muestran en el mapa. Para llegar a esta guía se obtendrán diversos mapas de la región India con datos climáticos que podrán ser utilizados como fuente de información para cualquier otro estudio climático o energético en los meses de Junio a Octubre en esta región. Se explicará cómo funcionan los archivos y herramientas que utiliza el programa y como se crean nuevas variables climáticas.

Además también se obtendrán mapas con información sobre el agua necesaria en el sistema PDEC en esta región. Gracias a esto se podrá determinar cuál es la superficie que necesita el captador de agua de lluvia para suplir el sistema de un determinado edificio gracias a la correlación entre superficie útil y superficie del acumulador.

Se compararan dos casos reales de inclusión de PDEC con el mapa de aplicabilidad, mostrando donde se encuentran en el mapa. A su vez también compararemos los resultados de la creación del mapa de aplicabilidad con el mapa de zonas climáticas de Köppen-Geiger, realizando una pequeña comparativa entre el potencial de uso para implementar el PDEC en esta región.

Palabras clave: Aplicabilidad India; PDEC India; Mapa PDEC; Captador PDEC; Ahorro energético India

AGRADECIMIENTOS

Por la paciencia en esos largos días de escritura y cálculos sin poder pasearte, Nala.

Por la larga espera para conseguir algo que se podría haber conseguido hace mucho tiempo, Mi familia.

Por los acelerones y paradas en la creación del trabajo, Mi tutor.

Por esos momentos desaprovechados, A mí.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	MOTIVACIÓN DE LA ELECCIÓN DE INDIA.....	5
1.1.1.	Consumo Eléctrico	5
1.1.2.	Climatología	8
1.1.3.	Política, Programas y Estudios propios de India.....	11
1.2.	ENFRIAMIENTO PASIVO EVAPORATIVO (PDEC).....	13
1.3.	ANTECEDENTES	15
2.	METODOLOGÍA.....	17
2.1.	PRIMER PASO: DATOS METEOROLÓGICOS	18
2.2.	SEGUNDO PASO: Cálculo de los parámetros	20
2.3.	TERCER PASO: CREACIÓN DE MAPAS METEOROLOGICOS.....	21
2.3.1.	Interpolación IDW de DBT_f y Mapeado de DBT_f	23
2.3.2.	Mapeado de DBT con dependencia de Altura.....	28
2.3.3.	Creación del parámetro WBT_f y su mapeado	32
2.3.4.	Creación del Mapeado WBT de India	34
2.3.5.	Mapa de Humedad Relativa (%) en India	35
2.3.6.	Mapa de Precipitaciones (mm/m ²).....	37
2.4.	CUARTO PASO: MAPEADO DE APLICABILIDAD DEL PDEC.....	39
2.4.1.	Mapa DBT-WBT en India.....	40
2.4.2.	Mapa i_{26} -WBT en India.....	41
2.4.3.	Reclasificación de Mapeados	43
2.4.4.	Creación del Mapa de Aplicabilidad mediante el MSP.....	44
2.4.5.	Mapa de Aplicabilidad de PDEC con mayor relevancia en DBT-WBT ..	47
2.4.6.	Mapa de Cooling Degree Days (CDD) en los meses de Verano en India	49
2.5.	ANÁLISIS DEL RECURSO HIDROGRÁFICO DEL SISTEMA PDEC.....	52

2.5.1. Obtención del agua necesaria para los PDEC	52
2.5.2. Diseño del Acumulador y Captador de Agua para el PDEC en India.....	58
3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON CASOS REALES Y MAPA DE CLIMAS KÖPPEN-GEIGER EN INDIA	64
3.1. Edificio de la Confederación de Industria India (CII), Bangalore.....	64
3.2. Edificio de Green Business Centre (GBC), Hyderabad.....	73
3.3. Edificio Torrent Research Building (TRB), Ahmedabad	81
3.4. Comparativa de gasto de Agua con un Caso Experimental de Turín, Italia....	87
3.5. Comparación con el Mapa de Climas de Köppen-Geiger en India	89
4. CONCLUSIÓN	92
Bibliografía.....	94

Índice de Figuras

Figura 1 Parque de Paneles Solares. Fuente EcoSolarEsp.Com.....	2
Figura 2 Operarios cambiando la Red de Distribución Eléctrica. Fuente TiempoRegio.Com.	2
Figura 3 Mejoras de envolvente de una vivienda. Fuente GreenBuildingSolutions.Org.	3
Figura 4 Ilustración del flujo de aire en un PDEC. (Ford, 2010)	4
Figura 5 Ilustración de la mentalidad de Eficiencia y Objetivo. Fuente Assets.Wired.Com.....	4
Figura 6 Consumo eléctrico en India por Sectores. Fuente COS 2017.	5
Figura 7 Metodos de obtención de la Energía Eléctrica en India. Fuente CSO 2017.	6
Figura 8 Tendencia del REC en India en las últimas décadas. Fuente CEA 2015.....	7
Figura 9 Uso final de la energía eléctrica en India. Fuente Prayas Energy Group 2016..	7
Figura 10 Ranking basado en el REC de cada Estado Indio. Fuente CEA 2012.	8
Figura 11 Mapa de Zona Climática de India. Fuente National Building Code 2005.....	10
Figura 12 Funcionamiento de un antiguo templo Mongol. (Ford, 2010).....	15
Figura 13 Datos de la Estación Meteorológica situada en Port-Blair, India. Fuente Propia.....	19
Figura 14 Datos en Excel calculados de los datos de las estaciones disponibles. Fuente Propia.....	20
Figura 15 Correlación entre DBT y la Altura. Fuente Propia.	22
Figura 16 Método gráfico de la distancia inversa ponderada (IDW). Fuente ARCGIS.	23
Figura 17 IDW con Potencia igual a 1. Fuente ARCGIS.....	24
Figura 18 IDW con Potencia igual a 2. Fuente ARCGIS.....	24
Figura 19 Interfaz de la herramienta IDW de ArcMap. Fuente Propia.	25
Figura 20 Tabla Excel de distancia entre estaciones meteorológicas disponibles. Fuente Propia.....	27
Figura 21 Mapa de Nivel Admin1 con las estaciones meteorológicas disponibles en este estudio. Fuente Propia.	27

Figura 22 Mapa de DBT no correlacionando la cota. Se añaden las estaciones. Fuente Propia.....	28
Figura 23 Ejemplo de Imagen DEM. Fuente ARCGIS.....	29
Figura 24 Ráster de Elevaciones de la Región de India y Suroeste Asiático	29
Figura 25 Interfaz de la herramienta Raster Calculator de ArcMap. Fuente Propia.	30
Figura 26 Mapa de DBT en función de la cota de cada punto del mapa. Fuente Propia.	31
Figura 27 Correlación de la WBT y la Altura. Fuente Propia.....	32
Figura 28 Mapa de WBT en India con todos los puntos al mismo nivel. Fuente Propia.	33
Figura 29 Mapa de WBT en India correlacionada con la Altura geográfica. Fuente Propia.....	35
Figura 30 Correlación entre Humedad Relativa y Altitud. Fuente Propia.	36
Figura 31 Mapa de Humedad Relativa en India. Fuente Propia.....	37
Figura 32 Mapa de precipitaciones acumuladas entre los meses de Abril a Septiembre. Fuente Propia.....	38
Figura 33 Mapa de precipitaciones acumuladas entre los meses de Octubre a Marzo. Fuente Propia.....	38
Figura 34 Mapa de precipitaciones acumuladas anuales. Fuente Propia.	39
Figura 35 Mapa de la diferencia de DBT y WBT. Fuente Propia.	41
Figura 36 Mapa de la diferencia de 26°C con la WBT. Fuente Propia.	42
Figura 37 Interfaz de la herramienta Reclassify de ArcMap. Fuente Propia.	43
Figura 38 Reclasificación del Mapa i26-WBT. Fuente Propia.	44
Figura 39 Reclasificación del Mapa DBT-WBT. Fuente Propia.....	44
Figura 40 Interfaz de la herramienta Weighted Sum de ArcMap. Fuente Propia.	46
Figura 41 Mapa de Aplicabilidad del PDEC en India. Fuente Propia.....	47
Figura 42 Mapa de Aplicabilidad del Sistema PDEC en India con MSP. Fuente Propia.	49

Figura 43 Mapa de CDD para los meses de verano en India. Fuente Propia.	51
Figura 44 Esquema del sistema PDEC. (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017). 52	
Figura 45 Mapa de Aplicabilidad del PDEC con los cuerpos de agua de India más importantes. Fuente Propia.	53
Figura 46 Mapas de HR y DBT en India. Fuente Propia.	53
Figura 47 Relación de Temperatura y saturación de agua. Fuente Propia.	54
Figura 48 Interfaz del Raster Calculator en ArcMap. Fuente Propia.	55
Figura 49 Cantidad de agua añadida por cada m ³ de aire para llegar a la saturación. Fuente Propia.	56
Figura 50 Volumen de agua añadida al flujo de aire de entrada por hora y m ² útil. Fuente Propia.	58
Figura 51 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Fuente Propia.	60
Figura 52 Diseño de un acumulador de agua. Método de Sombrilla invertida. Fuente Bopiweb.	61
Figura 53 Mapa de Volumen total de agua añadida al flujo de aire por m ² útil. Fuente Propia.	62
Figura 54 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m ² útil. Fuente Propia.	63
Figura 55 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.	67
Figura 56 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.	67
Figura 57 Mapa de Humedad Relativa en India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.	68
Figura 58 Tabla de Puntuación. Rombo determina el valor medio de puntuación. Marca azul determina la puntuación media global de los casos estudiados. Fuente (Ford, 2010)	69

Figura 59 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio CII. Fuente Propia.....	71
Figura 60 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando CII. Fuente Propia.....	72
Figura 61 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m ² útil. Localización del CII. Fuente Propia.	73
Figura 62 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.....	75
Figura 63 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.....	76
Figura 64 Mapa de Humedad Relativa de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.....	76
Figura 65 Tabla de Puntuación de 22 usuarios. Rombo determina el valor medio de puntuación. Marca azul determina la puntuación media global de los casos estudiados. (Ford, 2010).....	77
Figura 66 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.....	79
Figura 67 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando GBC. Fuente Propia.....	80
Figura 68 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m ² útil. Localización del GBC. Fuente Propia.	81
Figura 69 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.	83
Figura 70 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.	83
Figura 71 Mapa de Humedad Relativa de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.....	84
Figura 72 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.....	84

Figura 73 Volumen de agua añadida al flujo de aire de entrada por hora y m ² útil. Localizando TRB. Fuente Propia.	85
Figura 74 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando TRB. Fuente Propia.	86
Figura 75 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m ² útil. Localización del TRB. Fuente Propia.	87
Figura 76 Mapa de clasificación climática de India según Köppen-Geiger. Fuente Wikipedia.Com	90
Figura 77 Mapa de Aplicabilidad del PDEC en India. Fuente Propia.....	90

Índice de Tablas

Tabla 1 Valores Característicos según el Clima. Fuente BEE 2014.	10
Tabla 2 Valores de CDD y HDD de cuatro ciudades principales. Fuente Rawal & Shukla 2014.	11
Tabla 3 Tabla de Valores y Rangos para la Clasificación de la Aplicabilidad. Fuente Propia.	40
Tabla 4 Tabla de Valores de Aplicabilidad. Fuente Propia.	46
Tabla 5 Tabla de valores de Aplicabilidad con MSP. Fuente Propia.	48
Tabla 6 Datos obtenidos del Caso de Estudio de Turín, Italia. Fuente Propia.	88
Tabla 7 Datos de Agua Consumida por el edificio cruzado con el archivo climático (TMY) para el 5 de Agosto. Fuente Propia	88
Tabla 8 Datos de otras fechas del TMY con un Volumen de Agua Consumida cercano al caso de estudio. Fuente Propia.	89

Índice de Imágenes

Imagen 1 Foto del edificio CII en Bangalore, India. (Ford, 2010).....	65
Imagen 2 Torres del sistema PDEC del edificio CII en Bangalore, India. (Ford, 2010)	66
Imagen 3 Foto aérea del edificio Green Business Centre en Hyderabad, India. Fuente Picasa.....	74
Imagen 4 Foto del Edificio Torrent Research Building. Fuente TorrentPharma.Com...	82

1. INTRODUCCIÓN

En esta introducción dilucidamos porque se ha optado por realizar este estudio de aplicabilidad del PDEC en India desde diversos aspectos, y explicaremos en que consiste un Sistema de Enfriamiento Evaporativo Pasivo (PDEC).

Como ya sabemos, uno de los mayores retos que tiene la sociedad civil y política hoy en día es crear un proyecto conjunto que de soluciones al llamado “Cambio Climático”. Las emisiones de CO₂ son el mayor responsable de la subida de temperatura media global cada año. Los edificios, ya sean viviendas o terciarios, son responsables de más del 40% del consumo de energía primaria en el mundo (Chiesa, Geo-climatic potential of direct evaporative cooling in the Mediterranean Region: A comparison of key performance indicators, 2019). Por tanto debe ser un objetivo primordial el estudio y mejora del Parque de Edificios a nivel global para encontrar la mejor solución posible de mejora de la eficiencia energética y por tanto rebajar notablemente las emisiones de CO₂ al medio-ambiente.

Por esta causa muchos gobiernos y asociaciones están creando nuevas ayudas y programas para el ahorro energético. Para este ahorro energético se plantean varias alternativas.

- Opción A: **Fuentes de Energía Renovables.** Todos los países tienen en mayor o menor medida una dependencia de combustibles fósiles elevada. Estos combustibles producen en la transformación a energía eléctrica o térmica un volumen elevado de CO₂. Lo que se propone es la implantación de métodos de captación eléctrica por medios que no generen gases de efecto invernadero. Como puede ser con Plantas Solares, Eólicas, Birreactores...



Figura 1 Parque de Paneles Solares. Fuente EcoSolarEsp.Com.

- **Opción B: Actualización de Sistemas de Generación.** Aquellos países que tienen la red de distribución eléctrica o aparatos de consumo en edificios terciarios antiguos deberán actualizarlos para que la eficiencia sea mucho mayor y por tanto el ahorro eléctrico acometido sea substancial.



Figura 2 Operarios cambiando la Red de Distribución Eléctrica. Fuente TiempoRegio.Com.

- **Opción C: Mejora del Parque de Viviendas y Terciarios.** Se han de crear unas directrices para la renovación de todas las viviendas y edificios de uso terciario. Esta opción se creará para que las edificios que tienen un elevado consumo puedan acercarse a las edificios con normativa NZEB (Edificios de Cero Emisiones). Todas las mejoras llevadas a cabo deberán estar apoyadas con las

ayudas gubernamentales pertinentes. Aquí deberemos dividir en dos campos distintos:

- **Envolvente del edificio:** Se deberá hacer un estudio previo sobre la envolvente del edificio, es decir, comprobar cuál es la transmitancia térmica que tienen las paredes al exterior, los suelos, las ventanas, el techo... Todo esto se considerará para estudiar las mejoras térmicas de la envolvente. Este paso si se realiza de un modo correcto puede acarrear cerca de un 50% de ahorro energético.

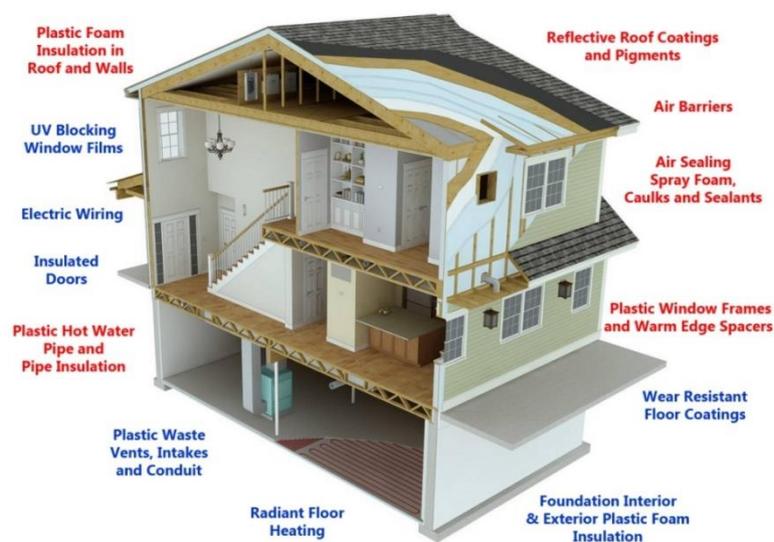


Figura 3 Mejoras de envolvente de una vivienda. Fuente GreenBuildingSolutions.Org.

- **Sistemas de Acondicionamiento del Edificio:** Conciernen a todos los aparatos y sistemas que intervengan en la creación del confort en el edificio. Y las mejoras irían desde actualizar esos sistemas, ya sea porque están obsoletos o por mejorar la eficiencia de dicho sistema, a sustituir un tipo de sistema por otro sistema novedoso y que tenga un menor impacto en las emisiones de CO₂. Por ejemplo, los Sistemas Pasivos Evaporativos que consumen muy poca electricidad y pueden crear un confort del mismo orden que un Aire-Acondicionado convencional (HVAC). En este campo es donde nos centraremos para observar la viabilidad en la región de India, como previamente ya se realizaron estos estudios en EE.UU., Europa y China.

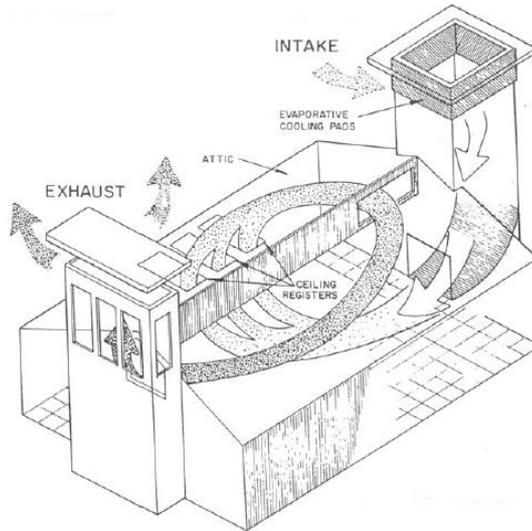


Figura 4 Ilustración del flujo de aire en un PDEC. (Ford, 2010)

- **Opción D: Mejora del comportamiento de la Sociedad.** El comportamiento del usuario de cualquier objeto de consumo que tenga como residuo un incremento de las emisiones de CO₂ es muy importante. Este campo es más complejo que los anteriores pero tiene un coste más bajo para las administraciones si difunden las ideas de forma adecuada. Además produce directa e indirectamente una toma de decisiones que llevan a cabo un decremento del desaprovechamiento energético en muchas situaciones.



Figura 5 Ilustración de la mentalidad de Eficiencia y Objetivo. Fuente Assets.Wired.Com.

1.1. MOTIVACIÓN DE LA ELECCIÓN DE INDIA

En India, está estimado que tan sólo el 79% de la población tiene acceso a la electricidad, con una población estimada en 1,281,935,911 personas (Julio 2017), por tanto debemos estudiar la posibilidad de la aplicación del Enfriamiento Pasivo Evaporativo (PDEC) en India, dado que es el tercer país que consume más energía del mundo, alrededor de 1.002 billones de KWh al año (2015).

1.1.1. Consumo Eléctrico

El consumo estimado de electricidad se elevó desde 0.456 GWh durante 2006-2007 hasta 1.002 GWh durante 2015-2016 por tanto podemos observar que se ha duplicado prácticamente el consumo de energía eléctrica en India en la última década. Aunque la producción de dicha energía eléctrica no suponga un problema para India si lo es la emisión de gases contaminantes al ambiente, y teniendo en cuenta que es el tercer país del mundo en consumo eléctrico, por detrás de USA y China, es muy importante reducir el gasto de energía eléctrica y la dependencia de fósiles para la generación de energía eléctrica.

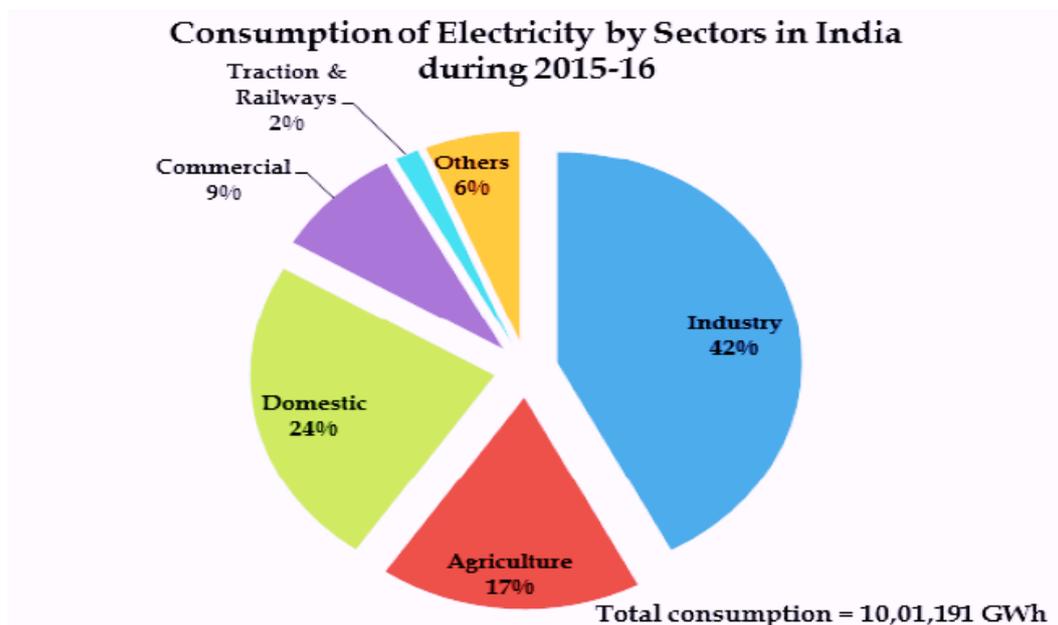


Figura 6 Consumo eléctrico en India por Sectores. Fuente COS 2017.

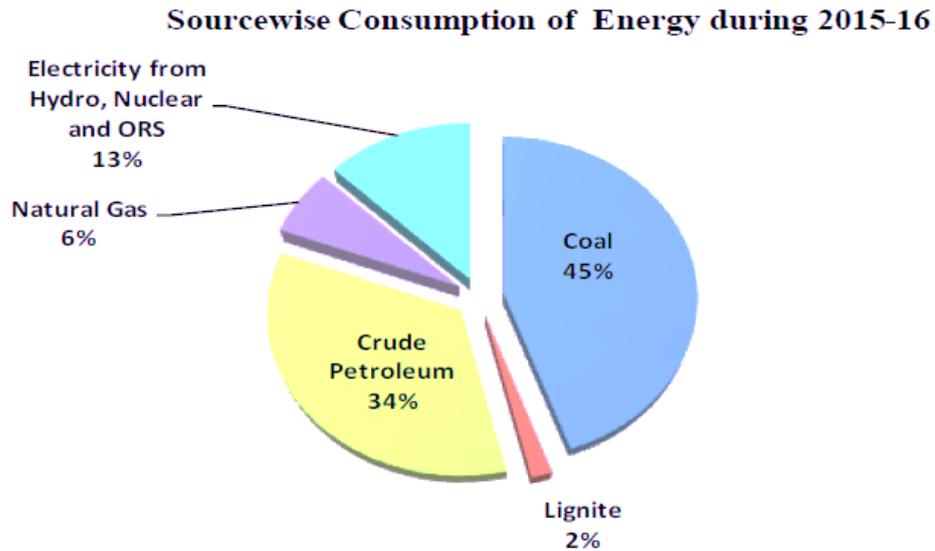


Figura 7 Metodos de obtención de la Energía Eléctrica en India. Fuente CSO 2017.

Del total de la energía eléctrica consumida estimada el 42.3% es del sector industrial y el 23.86% es del sector residencial, dichos sectores han aumentado el gasto eléctrico desde 2006-2007 a 2015-2016 en un 9.47% y un 7.97% respectivamente.

Si nos centramos en el Consumo Eléctrico Residencial (REC) observamos que el consumo de energía eléctrica se establece en torno a 194.26 TWh al año (2014) y ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos 50 años debido al acceso a nuevos artículos para aumentar su confort. Además el acceso a la red eléctrica y la subida de nivel de vida de las familias que estaban en el umbral de la pobreza crean una tendencia marcadamente exponencial.

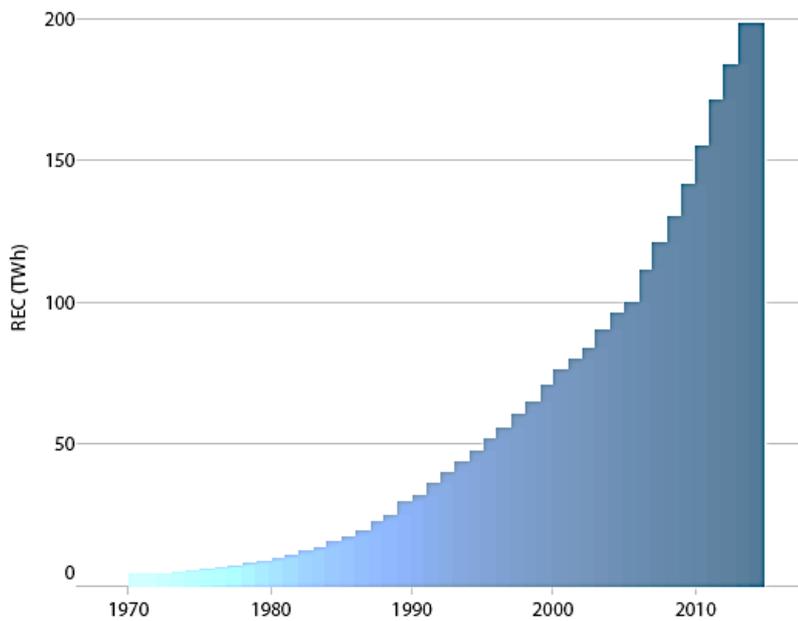


Figura 8 Tendencia del REC en India en las últimas décadas. Fuente CEA 2015.

Aunque no hay un estudio claro de gasto eléctrico en residenciales para India se han llegado a suposiciones cercanas a la realidad del país donde se pueden observar aproximadamente el uso final de los REC.

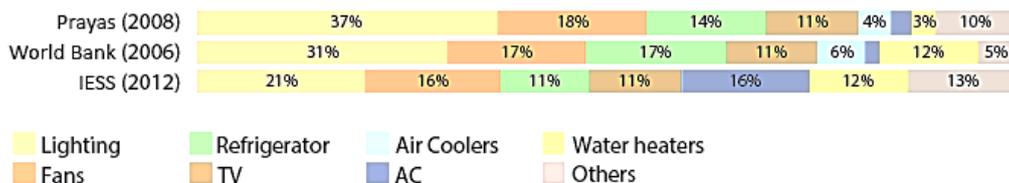


Figura 9 Uso final de la energía eléctrica en India. Fuente Prayas Energy Group 2016.

Se observa una clara tendencia de uso de Aires Acondicionados (AC) en los últimos años debido al aumento de la renta per cápita de la clase media.

Existe a su vez una clara diferenciación entre Estados en lo que al REC se refiere, siendo estados como Tamil Nadu y Delhi los de mayor gasto. Delhi, el Estado con el REC per cápita más alto consume hasta cuatro veces más por habitante que el promedio de la India y 25 veces más que Bihar, uno de los Estados de menor

clasificación de consumo de India, basado en el REC per cápita. El REC total de Delhi es más elevado que el Estado de Gujarat completo, uno de los estados más ricos, con una población de alrededor de tres veces que Delhi.

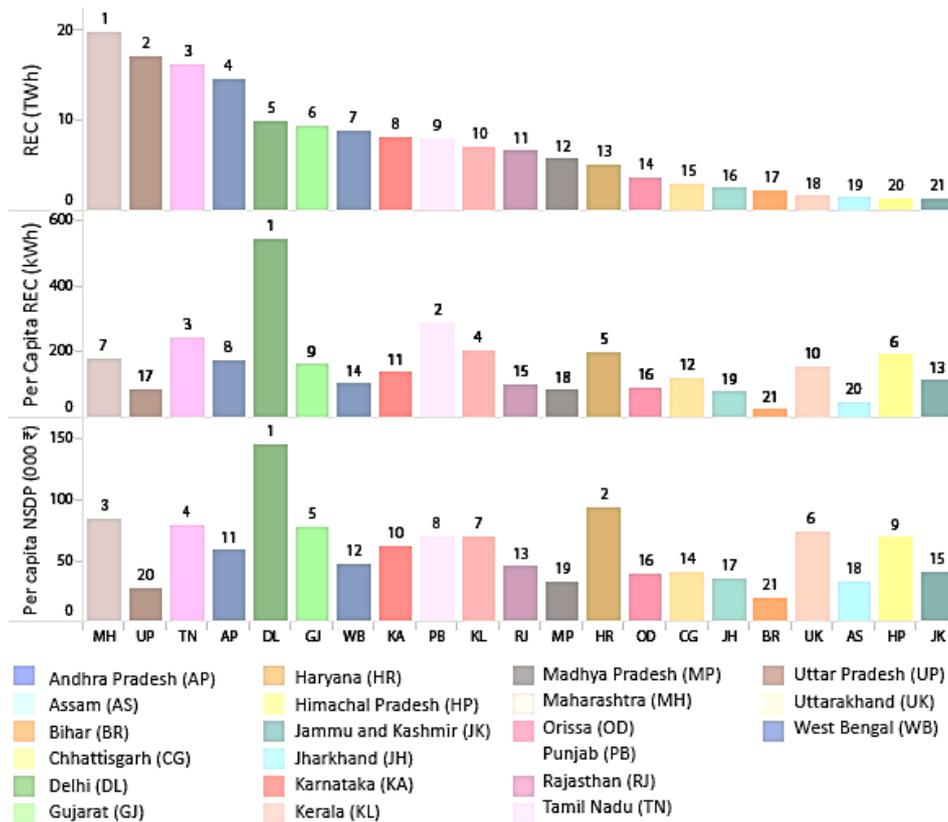


Figura 10 Ranking basado en el REC de cada Estado Indio. Fuente CEA 2012.

Con toda esta información es posible remarcar la importancia de la implantación y modernización de nueva tecnologías de refrigeración en India debido a su alto potencial expansivo en el consumo eléctrico en las viviendas.

Debemos apuntar también que los aires acondicionados (AC) han sido finalmente reconocidos por las Asociaciones Medio-Ambientales como un factor importante en el calentamiento global y el Cambio Climático.

1.1.2. Climatología

Aunque más adelante observaremos el mapa climático de Köppen-Geiger de India, podemos observar desde otra perspectiva que India tiene cinco zonas climáticas

diferentes basadas en los niveles promedio de temperatura y humedad. Las características climáticas afectan significativamente a la propiedad y el uso de los dispositivos: la gente usa más ventiladores y AC en climas cálidos mientras usan más calentadores de agua y otros aparatos de calefacción en climas más fríos.

La relación entre el clima y la energía requerida por los consumidores es a menudo cuantificado por enfriamiento y calentamiento grados días (CDD y HDD). Los Días de Grado de Enfriamiento (CDD) son una medida de cuánto (en grados), y por cuánto tiempo (en días), la temperatura del aire exterior estaba por encima de un cierto nivel (referencia temperatura). CDD es el número promedio de días en que se requeriría enfriamiento. Grado de calefacción días es la medida correspondiente para el promedio de días en que se requeriría calefacción. Un importante parámetro en los cálculos de CDD y HDD es la temperatura de referencia: una temperatura de confort óptimo donde no se requiere enfriamiento ni calentamiento. En un país tropical como India, los CDD son significativamente más que los HDD. Los CDD más altos generalmente significan más consumo de electricidad. Sin embargo, también se debe tener en cuenta que el número de CDD cambia drásticamente en función de la referencia temperatura considerada.

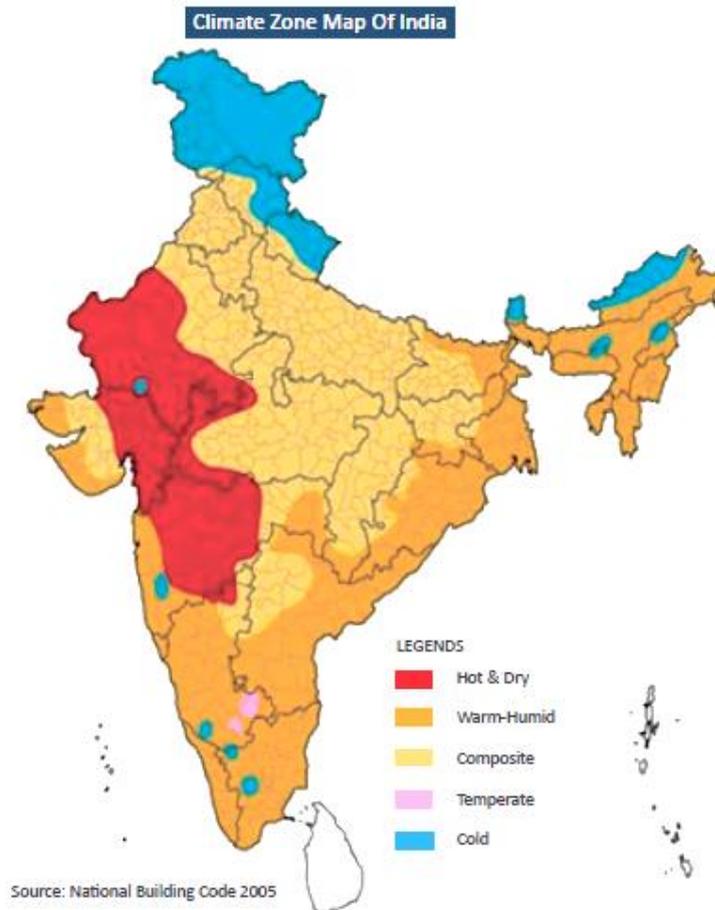


Figura 11 Mapa de Zona Climática de India. Fuente National Building Code 2005.

Climate	Characteristics
Hot & Dry	Summer: 20-45°C; Winter: 0-25°C Relative humidity: 55%
Warm-Humid	Summer: 25-35°C; Winter: 20-30°C Relative humidity: 70-90%
Composite	Summer: 27-43°C; Winter: 4-25°C Relative Humidity: 20-25% (dry) 55-95% (wet)
Temperate	Summer: 17-34°C; Winter: 16-33°C Relative humidity: <75%
Cold	Summer: 17-30°C; Winter: -3 to 8°C Relative Humidity: 70-80%

Tabla 1 Valores Característicos según el Clima. Fuente BEE 2014.

City	HDD @ 18°C	CDD @ 18°C	CDD @ 25°C
Ahmedabad	120	3441	1738
Pune	148	2485	758
Mumbai	0	3567	1374
New Delhi	456	2928	1314

Tabla 2 Valores de CDD y HDD de cuatro ciudades principales. Fuente Rawal & Shukla 2014.

Se estudió el impacto del clima en la demanda de electricidad y su relación con el estatus económico utilizando los datos de consumo diario de electricidad del operador de la red nacional en India (Gupta, 2014). Se averiguó que cada aumento de 1 ° Celsius en la temperatura en el verano aumenta la demanda de electricidad diaria esperada en un 1.5% debido al mayor uso de enfriadores de aire, AC y ventiladores. También descubrió que el efecto marginal del clima más cálido es mayor cuando los ingresos son más altos, particularmente en países como India donde la penetración al mercado de AC es baja. Este efecto se puede observar en una encuesta realizada en aproximadamente 800 apartamentos distribuidos en las principales ciudades en diferentes zonas climáticas (Rawal & Shukla, 2014). Delhi y Mumbai con mayores temperaturas y los ingresos más altos tienen un consumo anual más alto que otras ciudades, así como también del consumo nacional promedio. Curiosamente, los apartamentos en Pune muestran un mayor consumo que los de Ahmedabad, aunque los CDD en Pune son la mitad en comparación con las de Ahmedabad. Cabe señalar que en dicho estudio también se tipificó por tipos de apartamentos.

1.1.3. Política, Programas y Estudios propios de India

Las políticas y programas dirigidos por el gobierno o por los DISCOM están enfocados en que los consumidores compren más electrodomésticos que ahorren energía y adoptar medidas de conservación. La mayoría de estas políticas y los programas se centran en mejorar la tecnología (por ejemplo, la I + D patrocinada por el gobierno), reduciendo los precios (por ejemplo, los subsidios para productos energéticamente eficientes), o proporcionar información (por ejemplo, etiquetas de energía y promoción). Algunos de los nuevos programas se enfocan en intervenciones del comportamiento para empujar a las personas hacia acciones positivas. Los programas de Eficiencia Energética en India se han centrado principalmente en los precios y la información.

La Oficina de Eficiencia Energética (BEE) ha estado llevando a cabo el programa de Normas y Etiquetado (S&L) desde 2006. Los electrodomésticos menos eficientes reciben una calificación de 1 estrella, mientras que los más eficientes reciben una calificación de 5 estrellas. El programa es obligatorio para algunos electrodomésticos como AC y frigoríficos mientras que es voluntario para los otros tipos. Además de establecer altos niveles de eficiencia para estándares y etiquetas y hacer cumplir un cumplimiento estricto, es importante asegurarse de que las personas conozcan las etiquetas y usen la información mientras están comprando electrodomésticos. La cantidad de electrodomésticos etiquetados con estrellas ha aumentado en los últimos años. Sin embargo, hay muy pocos estudios sobre conciencia y propiedad de los dispositivos con etiqueta de estrella. Se realizó una encuesta de alrededor de 20,000 hogares de India en 2011 y tras el análisis de los datos se demostró que solo el 19% de todos los hogares conocía el programa S&L de BEE. La conciencia era alta en las áreas urbanas. También se descubrió que las regiones del norte y oeste de la India eran mucho menos conscientes del programa que las regiones del sur y del este (Chatterjee & Singh, 2012). La población está al tanto del programa S&L pero no es suficiente. La mayoría de los clientes a la hora de comprar no entiende la información de la etiqueta energética y no se le da un uso correcto para comprar electrodomésticos de bajo consumo.

Un estudio de arquitectura encuestó a 45 apartamentos en Hyderabad para estudiar cómo las personas se adaptan al aumento de las temperaturas en el verano (Indraganti, 2011). El estudio averiguó que las personas se adaptan al calor haciendo cosas simples como mudarse a lugares aireados y beber agua. La gente se siente cómoda entre 26°C y 32°C. Esto es mucho más alto que las temperaturas de confort consideradas en los códigos de construcción indios (23°C a 26°C). También se observó que las personas frecuentemente expuestas a ambientes con aire acondicionado tenían menos niveles de tolerancia.

Los estudios de HCI se han centrado en estudiar el uso de la energía por parte de las personas para ayudar en el diseño de diversos tipos de conservación de energía tecnologías. Se realizó un estudio sobre los hábitos de consumo de energía de 11 hogares en Bangalore y Hyderabad (Shrinivasan, y otros, 2013). Observaron que la tradición y la cultura han arraigado profundamente los valores de conservación en sus

participantes. Las personas ya son conscientes de su consumo y, por lo tanto, no sienten la necesidad de un método de control de la energía en el hogar. Por el contrario, un equipo de investigadores encuestó a unos 1.700 residentes de todo Delhi y no observó una cultura profundamente arraigada de conservación energética (Jain, Chhabra, Mankoff, & Singh, 2014). Las personas ponen en práctica los métodos de ahorro energético debido a los hábitos aprendidos y el deseo de ahorrar dinero. Comodidad y conveniencia eran los principales obstáculos. Los participantes si estaban interesados en el control de energía del hogar y tampoco les importó compartir sus datos de energía con otros.

La investigación en economía del comportamiento se centra en el uso de diferentes tendencias de comportamiento de manera efectiva para empujar personas hacia acciones positivas. Uno de esos estudios ratifica que el sector de la energía es ampliamente considerado como uno de los mayores obstáculos para el crecimiento económico de la India (Sudarshan, 2014). Casi la mitad de la energía extraída de la red no se paga y no está calibrada, ni facturada o es robada de la red principal. En el estado de Bihar, el 45% de la energía consumida está dentro de esta categoría. El Gobierno de Bihar está tratando de resolver este problema y ampliar el acceso a la electricidad mediante la implementación de reformas para mejorar las finanzas y la disponibilidad de energía de la Junta de Electricidad del Estado de Bihar.

1.2. ENFRIAMIENTO PASIVO EVAPORATIVO (PDEC)

El enfriamiento de edificios por medios naturales se data desde el antiguo Egipto y se extendió desde la región India hasta el sur de España y norte de África. Se diferenciaron varias técnicas pero con un patrón común. Utilizaban el viento exterior para introducirlo en zonas donde había cuerpos de agua para que la temperatura bajara y se introdujera dentro del edificio con una temperatura más agradable.

No es hasta el siglo XX cuando comienzan a aplicarse a edificios de todo el mundo con entradas de aire controladas mecánicamente, aunque la tendencia que se quiere rescatar es que el flujo de aire este controlado naturalmente con el viento del exterior.

El PDEC tiene un alto ahorro y rendimiento energético si se aplica en un lugar adecuado para ello. Podemos diferenciar varios tipos de PDEC, dependiendo del modo de adición del agua necesaria para enfriar al flujo de aire.

- **Torres Húmedas:** Son aquellas torres de PDEC que contienen membranas húmedas en el paso del flujo de aire. Este tipo de PDEC necesita flujos de aire elevados (10-20 renovaciones por hora).
- **Paso por Medio Poroso:** En el sistema se hace pasar el flujo de aire por medios porosos húmedos como la cerámica. El problema principal es la baja calidad del agua, pueden producirse humedades y creación de bacterias en dicho sistema con más facilidad.
- **Micronizadores:** Este sistema se ha utilizado para regadío durante bastante tiempo, no es necesario crear una torre de flujo de aire dado que se puede aplicar directamente en el habitáculo. Pero la opción más correcta es la conjunción de una torre con micronizadores para poder tener un flujo de corriente estable en todo el edificio.
- **Ducha:** Este sistema es el equivalente al anterior pero sin la utilización de un sistema para crear gotas del orden de 10 micras. Si se utiliza este sistema se ha de recoger el agua sobrante en la base y volver a recircular para no malgastar dicho recurso.

Se podrá maximizar el enfriamiento dependiendo de las variables que intervienen en el PDEC. Estas variables son:

- Características climatológicas: Temperatura de Bulbo Seco (DBT), Temperatura de Bulbo Húmedo (WBT), y en relación a estos dos, la Humedad Relativa (HR) y Enfriamiento Grados Días (CDD) que nos dará una indicación de si es necesario plantearse el sistema.
- Características constructivas: Altura de la torre de refrigeración, sección de la toma de aire, volumen de agua evacuada al ambiente...

Cuando el agua se evapora dentro de la corriente del aire que viene del exterior la temperatura desciende y la humedad de este aumenta, lo cual produce que la densidad aumente lo que facilita también el movimiento del flujo de aire por el edificio.

La renovación del aire interior con aire exterior cada cierto tiempo crea un decremento de temperatura del orden de 1-2°C, si a esto le añadimos el descenso de temperatura provocado por la adición de agua al flujo de aire obtendremos valores aún más elevados de descenso de temperaturas. Por consiguiente alcanzamos un mayor confort con un menor gasto energético, reduciendo las emisiones producidas por el elevado coste eléctrico de los HVAC convencionales.

Remarcando la imperiosa necesidad de nuevos enclaves de ahorro energético que estén enfocadas en la conservación del medio ambiente y, a su vez, que se encuentren dentro del comportamiento cultural e histórico, el sistema PDEC puede ser el enclave debido a que posteriormente ya fue utilizado en los palacios Mongoles de India.

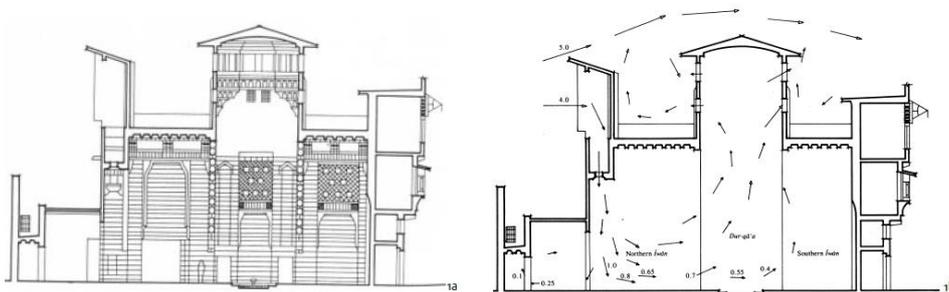


Figura 12 Funcionamiento de un antiguo templo Mongol. (Ford, 2010).

1.3. ANTECEDENTES

A continuación repasaremos brevemente estudios previos del Potencial Geo-Climático realizado por diversos investigadores.

- **Potencial de Aplicabilidad en EE.UU.:** En el estudio realizado se crean nuevos mapas de aplicabilidad y clasificación climática para EE.UU. basados en el desarrollo de variables como DBT y WBT (Aparicio-Ruiz, Schiano-Phan, & Salmerón-Lissén, 2018). A su vez se muestran 4 casos de estudio in-situ del sistema PDEC en cuatro condados de EE.UU.. De esta forma se validan los

datos obtenidos mediante la creación del mapa de aplicabilidad que mostraran el potencial de uso del sistema PDEC como alternativa o complemento a los sistemas HVAC que existan.

- **Potencial Geo-climático de Aplicabilidad en el Mediterráneo:** Este estudio analiza la aplicabilidad del PDEC en la región mediterránea para mejorar el confort térmico (Chiesa, Huberman, & Pearlmutter, Geo-climatic potential of direct evaporative cooling in the Mediterranean Region: A comparison of key performance indicators, 2019). Se evalúa con detalle el potencial del uso de este sistema realizando simulaciones térmicas en 60 ciudades que representan diferentes zonas climáticas mediterráneas y diferentes tipos de edificios. Se observa tras este estudio que las regiones con alto potencial del uso de PDEC se encuentran en el sur de España y en la zona Este mediterránea.
- **Aplicabilidad Climática del Enfriamiento Evaporativo en Europa:** Mediante este estudio se proporcionan nuevos mapas para la aplicación de sistemas PDEC en Europa (Salmeron, Sánchez, Sánchez, Álvarez, & José Luís Molina, 2012). En dicho artículo también se comparará algunas zonas de aplicabilidad con las zonas climáticas de Köppen-Geiger. Pretende ser una guía útil para diseñadores, ingenieros y arquitectos que quieran utilizar estos sistemas PDEC en lugar de los HVAC convencionales.
- **Aplicabilidad Geo-Climática del PDEC y NVC en China:** El artículo presente un estudio de aplicabilidad del sistema PDEC y de sistemas de ventilación natural controlada (NVC) en la región China (Chiesa, Geo-climatic applicability of evaporative and ventilative cooling in China, 2016). El estudio que relaciona el sistema PDEC con la región China se realiza en 105 localidades. Los datos obtenidos se muestran en mapas con puntos señalados que indican el potencial de uso de los sistemas en esa localidad.
- **Integración de PDEC en edificios existentes en India:** Existen varios casos de estudio de implementación de sistemas PDEC en India. Un estudio realizado en las proximidades de Turin, Italia, utiliza casos reales de sistemas implantados en India (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017), como son:
 - **Torrent Research Building:** Localizado en Ahmedabad, dispone de una torre central que usa el sistema PDEC que abastece todo el edificio (Ford, 2010).

- **CII Center:** Localizado en Bangalore, dispone de torres del sistema PDEC adheridas a un lateral del edificio. También existe un estudio de confort de usuarios que veremos más adelante (Ford, 2010).
- **Green Business Center:** Localizado en Hyderabad, dispone de dos grandes torres para el sistema PDEC que están separadas del edificio. Como en el caso anterior se realizó también una encuesta de confort (Ford, 2010).
- **Predicción del Rendimiento Térmico en Oficinas del PDEC en India:** El estudio realizado predice el comportamiento del PDEC para mejorar el confort en los meses de verano (Tewari, Mathur, & Mathur, 2019). Localizado dicho estudio en la ciudad de Jaipur se consiguen variables de control de temperaturas para el sistema PDEC. También se llega a la conclusión de que entre el 42-52% de las horas que los usuarios perciben malestar y falta de confort térmico se podrían evitar con sistemas PDEC.

2. METODOLOGÍA

La aplicabilidad del sistema PDEC viene dado por dos factores importantes. El primero de ellos es la diferencia de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo. El segundo de ellos es la diferencia de temperatura entre el aire que queremos conseguir dentro del edificio y la temperatura de bulbo húmedo. Al no disponer de esos datos en esta región deberemos crearlos. A partir de los siguientes pasos se podrá crear el mapeado de aplicabilidad del PDEC en India.

- Primer paso: Recopilación de los datos meteorológicos que se puedan obtener en toda la región de India.
- Segundo Paso: Una vez recogidos todos los datos meteorológicos se pasará a obtener varias variables, como el DBT y WBT, que nos ayuden a crear las variables de dependencia de la aplicabilidad.
- Tercer Paso: Una vez obtenidas dichas variables crearemos el mapa de datos meteorológicos en función de la cota de cada punto de la región India.

- Cuarto Paso: Con las variables que definen la aplicabilidad del PDEC en India ya calculadas y mapeadas, se establecerá el peso de esas variables que creamos más conveniente para crear nuestro Mapa de Aplicabilidad.

Además de este objetivo profundizaremos en la posibilidad de crear también una guía de uso y construcción aproximada de los captadores o acumuladores necesarios para el sistema en la región India.

Para el primer paso necesitaremos como consecuencia conseguir datos meteorológicos o ambientales de la región de India para poder realizar un estudio de este sistema.

2.1. PRIMER PASO: DATOS METEOROLÓGICOS

Lo primero que debemos tener en cuenta para crear cualquier mapeado de cualquier región es tener una buena base de datos de las estaciones meteorológicas.

Para este caso en concreto hemos obtenido los datos de 52 estaciones meteorológicas que la Sociedad India de Calefacción, Refrigeración e Ingenieros del Acondicionamiento Ambiental (ISHRAE) han subido a la red. Dichos datos están en un servidor público, aunque no es sencillo obtenerlos y vienen en varios formatos. El más utilizado es el .epw pero nosotros utilizaremos el formato .csv para poder trabajar de forma más cómoda con los datos que contienen. Aunque si es verdad que recientemente han modificado su portal de internet y puede que sea más sencillo acceder a los datos de las estaciones meteorológicas.

En una primera versión del archivo .csv podemos observar todos los parámetros que contiene.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	433330	PORT-BLAIR		5.5	11.667	92.717	79	IND	2	IND	Am								
2	Date (MM/DD/YYYY)	Time (HH:MM)	ETR (W/m^2)	ETRN (W/m^2)	GHI (W/m^2)	GHI source	GHI uncer	DNI (W/m^2)	DNI source	DNI uncer	DHI (W/m^2)	DHI source	DHI uncer	GH illum	GH illum s	Global illu	DN illum	(DN illum	
3	01/01/1994	1:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
4	01/01/1994	2:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
5	01/01/1994	3:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
6	01/01/1994	4:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
7	01/01/1994	5:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
8	01/01/1994	6:00	15	419	3 E	5	249 E	5	0 E	5	0 E	5	411 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E
9	01/01/1994	7:00	257	1411	131 E	5	375 E	5	63 E	5	63 E	5	14433 E	5	0 E	5	5080 E	5	0 E
10	01/01/1994	8:00	555	1411	359 E	5	627 E	5	112 E	5	112 E	5	40868 E	5	0 E	5	31255 E	5	0 E
11	01/01/1994	9:00	809	1411	554 E	5	692 E	5	158 E	5	158 E	5	64444 E	5	0 E	5	41223 E	5	0 E
12	01/01/1994	10:00	1000	1411	696 E	5	705 E	5	196 E	5	196 E	5	81926 E	5	0 E	5	43959 E	5	0 E
13	01/01/1994	11:00	1116	1411	764 E	5	668 E	5	235 E	5	235 E	5	90040 E	5	0 E	5	42789 E	5	0 E
14	01/01/1994	12:00	1149	1411	786 E	5	667 E	5	243 E	5	243 E	5	92822 E	5	0 E	5	42735 E	5	0 E
15	01/01/1994	13:00	1095	1411	749 E	5	669 E	5	230 E	5	230 E	5	88190 E	5	0 E	5	42442 E	5	0 E
16	01/01/1994	14:00	960	1411	643 E	5	638 E	5	209 E	5	209 E	5	74756 E	5	0 E	5	40361 E	5	0 E
17	01/01/1994	15:00	752	1411	486 E	5	599 E	5	167 E	5	167 E	5	55630 E	5	0 E	5	35791 E	5	0 E
18	01/01/1994	16:00	485	1411	285 E	5	498 E	5	114 E	5	114 E	5	31894 E	5	0 E	5	23022 E	5	0 E
19	01/01/1994	17:00	182	1411	79 E	5	246 E	5	47 E	5	47 E	5	8600 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E
20	01/01/1994	18:00	1	103	0 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E	5	0 E
21	01/01/1994	19:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?
22	01/01/1994	20:00	0	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 E	5	0 ?	0	0 ?	0	0 ?	0	0 ?

Figura 13 Datos de la Estación Meteorológica situada en Port-Blair, India. Fuente Propia.

Nosotros nos centraremos en los siguientes:

- **Fecha:** Estudiando los meses de Junio a Septiembre.
- **RH:** Humedad Relativa en %
- **DBT:** Temperatura de Bulbo Seca en °C
- **Dew-Point Temperature:** Punto de rocío en °C
- **WBT:** Temperatura de Bulbo Húmedo en °C
- **Precipitaciones:** Medida en mm por metro cuadrado que lo que equivale a litro que vienen dada en cada hora.
- **Coordenadas:** Latitud y Longitud de la estación.
- **Altura:** Metros sobre nivel de mar.

Con este conjunto de datos podemos crear otra Excel que contenga todas las estaciones y su información relevante y calcular nuevos elementos útiles en el estudio de implementación del PDEC.

Observamos en la Excel siguiente que contendrá todos los datos que necesitamos para los siguientes pasos a dar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	WMO	lon	lat	alt	state_province_regic	city	real count	Hours	DryBulbTemperatu	DewPointTemperatu	RelativeHumidi	WetBulbTemperatu	count_dbtwtbt	dbtwtbt	count_db
2	420270	74.833	34.083	1587	JK	Srinagar	1	2928	22.51796448	15.72834699	68	18.13888113	2928	4.37908335	
3	420710	74.867	31.633	234	PB	Amritsar	1	2928	29.82096995	23.49477459	71	25.3600378	2927	4.462469608	
4	421110	78.03	30.31	682	UT	Dehradun	1	2928	26.45095628	21.93855874	77	23.28722572	2927	3.164816373	
5	421310	75.73	29.16	221	TG	Hissar	1	2928	31.8625	23.50864071	66	26.07610461	2914	5.814463974	
6	421650	73.3	28	224	RJ	Bikaner	1	2928	32.62254098	21.73545082	56	25.16322407	2928	7.459316917	
7	421820	77.2	28.583	212	DL	New Delhi-Safdarjung AP	1	2928	30.42636612	23.66441257	70	25.70058252	2902	4.768625394	
8	423140	95.017	27.483	111	AS	Dibrugarh AP	1	2928	27.22687842	24.87561475	87	25.49153652	2928	1.735341893	
9	423280	70.91	26.9	231	RJ	Jaisalmer	1	2928	32.32001366	22.74924863	59	25.63604554	2928	6.683968119	
10	423390	73.017	26.3	217	RJ	Jodhpur	1	2928	31.51854508	21.27926913	58	24.56748785	2928	6.951057234	
11	423480	75.8	26.817	390	RJ	Jaipur Intl AP	1	2928	29.98726093	22.31458333	67	24.71053506	2918	5.294958391	
12	423610	78.25	26.23	207	MP	Gwalior	1	2928	30.81731557	22.05344945	63	24.79076415	2928	6.026551428	
13	423690	80.88	26.75	128	UP	Lucknow-Amausi-Singh Intl AP	1	2928	29.80198087	25.2380123	78	26.50045721	2921	3.309573837	
14	424100	91.583	26.1	54	AS	Guwahati-Bordoloi Intl AP	1	2928	28.12482924	25.55812842	86	26.21740699	2928	1.907422245	
15	424150	92.78	26.61	79	AS	Tezpur	1	2928	27.97161885	25.63323087	87	26.23495229	2928	1.736666567	
16	424520	75.85	25.15	274	RJ	Kota AP	1	2928	30.09525273	22.13128415	65	24.60091241	2928	5.494340327	
17	424750	81.733	25.45	98	UP	Allahabad-Bamrauli AP	1	2928	30.35696721	24.78811475	74	26.3580761	2901	4.036701458	
18	424790	82.86	25.45	85	UP	Varanasi-Shastri Intl AP	1	2928	29.75898224	24.3994194	75	25.93389887	2928	3.825083375	
19	424920	85.1	25.6	60	BR	Patna-Jayaprakash AP	1	2928	29.50601093	25.56936475	81	26.66660249	2928	2.839408442	
20	425160	91.883	25.567	1600	ML	Shillong	1	2928	18.86086066	17.13688525	90	17.630363	2928	1.230497658	
21	426340	69.66	23.25	80	GJ	Bhuj	1	2928	29.55375683	24.23483607	75	25.7538138	2925	3.803905045	
22	426470	72.633	23.067	55	GJ	Ahmedabad Patel Intl AP	1	2928	29.71495902	24.20765027	74	25.77215546	2927	3.944167142	

Figura 14 Datos en Excel calculados de los datos de las estaciones disponibles. Fuente Propia.

2.2. SEGUNDO PASO: Cálculo de los parámetros

Para poder realizar el mapeado necesitamos datos que no vengan en función directa de la fecha y hora sino de un periodo de tiempo establecido para el estudio. En nuestro caso ese periodo al ser el Hemisferio Norte nos centraremos en el periodo de Verano, que corresponde a los meses que van desde Junio hasta Septiembre.

Se procede entonces al cálculo de todas las horas y su creación de nuevos parámetros que se encuentran en esta nueva lista:

- **DBTWBT:** Este nuevo parámetro es la diferencia de temperaturas entre la Temperatura de Bulbo Seco (DBT) y la Temperatura de Bulbo Húmedo (WBT). Sobre esta diferencia calculada hora a hora se estima una media, que irá complementada con el parámetro COUNTDBTWBT que cuenta las horas donde la diferencia entre CBT y WBT está dentro del entorno del 10% del valor medio DBTWBT.
- **i26_WBT:** Este parámetro es el resultado de suponer una temperatura interior que sea igual a 26°C (i26), que está dentro del rango de temperaturas de confort, y restarle la temperatura de bulbo húmedo (WBT), dando como resultado una media, en los meses de verano, que estarán parametrizados por el valor i26_WBT. Este valor tiene un valor asociado a las horas totales que se produce esa media en su intervalo del 10% llamado count_i26_WBT.
- **CDD18:** Cooling Degree Days con base 18°C.
- **CDD26:** En esta ocasión el parámetro calculado Cooling Degree Days se realiza sobre la base 26°C. Como es lógico estos valores comparados con CDD18 serán

más bajos pero nos guiará con más exactitud para poder ver la diferencia de temperatura entre la Temperatura Exterior Media de cada día y la Temperatura de Confort (26°C).

Con todos estos datos podríamos crear una simulación sin tener en cuenta la altura de todas las estaciones climatológicas que tenemos. En nuestro caso para profundizar más en un mapeado que contenga la variable del terreno además de la información datada por las estaciones deberemos crear un nuevo paso intermedio para mejorar la precisión del Mapeado de Aplicabilidad del PDEC en India.

2.3. TERCER PASO: CREACIÓN DE MAPAS METEOROLOGICOS

Este apartado es esencial para el cálculo de cualquier variable respecto a la elevación del terreno, dado que con los diversos cálculos que mostraremos en adelante podremos crear una simulación de temperaturas que sean en función de la cota de cada punto del mapa.

Para este paso nos basamos en estudios ya realizados en este campo donde se explica de forma detallada la influencia de la altura de los puntos de estudio con respecto las temperaturas y radiaciones (Flor, Domínguez, & Félix, 2008).

Se elige como primera variable a estudiar en función de la altura la temperatura. Tenemos que calcular la función que más correlaciona nuestros datos de temperatura de bulbo seco (DBT) en función de la altura. Mediante un función lineal a través de Excel obtenemos lo siguiente:

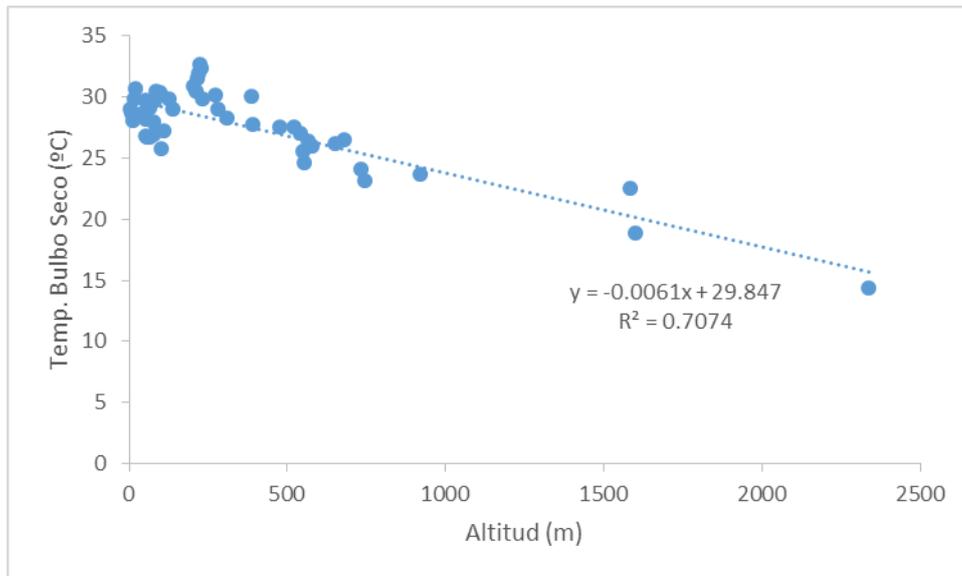


Figura 15 Correlación entre DBT y la Altura. Fuente Propia.

Con la siguiente Ecuación Lineal:

$$DBT_f = 29.847 - 0.0061\Delta z \quad (2.1)$$

Donde tenemos que:

- DBT_f : Es la Temperatura de Bulbo Seco Estimada para una cota y su valor se dará en °C.
- Δz : Es el parámetro de altura o cota de cada punto que queramos calcular respecto a una altura base. Siguiendo la siguiente formula.

$$\Delta z = z - z_b \quad (2.2)$$

En la cual:

- z : Es la altura del punto que se está calculando
- z_b : Es la altura base que implementamos para tener una referencia, que en nuestro caso es 8 metros.

Cabe remarcar que esta ecuación es válida solo para la región que se encuentra alrededor de las estaciones implementadas en este estudio. Esto es debido a que se toma de referencia las temperaturas y altitudes de puntos concretos de India y por tanto no sería válido extrapolar la misma situación a otras regiones fuera de India.

Este nuevo parámetro lo utilizaremos para crear el mapa de DBT_{fic} que será una interpolación siguiendo el método IDW. Con este cálculo lo que hemos hecho es bajar todas las estaciones meteorológicas a la misma cota (8 metros) para poder realizar un cálculo más exacto de interpolación en dos pasos.

2.3.1. Interpolación IDW de DBT_f y Mapeado de DBT_f

Gracias a la nueva variable DBT_{fic} ahora tenemos los datos de todas las estaciones meteorológicas en una misma cota. A partir de aquí lo que debemos hacer es la interpolación de esos datos para toda la región India.

Para ello vamos a usar el método IDW de interpolación. Se basa en la interpolación de datos conocidos para la creación de superficies o puntos de los cuales no tenemos algún dato pero si se podría calcular con uno de sus parámetros conocidos (Flor, Domínguez, & Félix, 2008). Por ejemplo con la distancia entre ese punto con valor desconocido y los puntos adyacentes conocidos podemos determinar el valor de dicho punto. Aunque en este tipo de interpolación la distancia a los puntos conocidos tiene un peso importante para la afectación del punto a calcular.

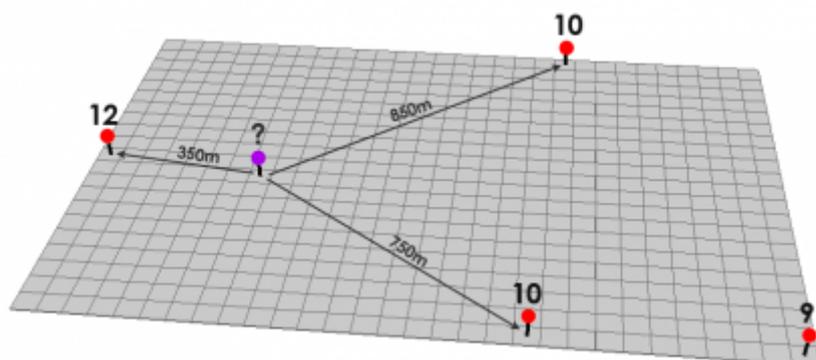


Figura 16 Método gráfico de la distancia inversa ponderada (IDW). Fuente ARCGIS.

Otro parámetro importante en el IDW es la Potencia de la Interpolación que podrá dar diferentes situaciones según su valor (Figura 1 y Figura 2).

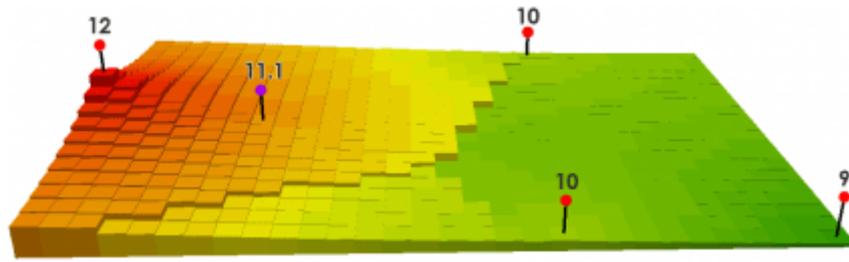


Figura 17 IDW con Potencia igual a 1. Fuente ARCGIS.

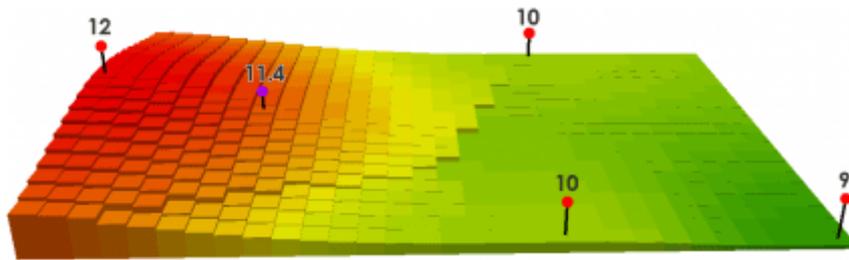


Figura 18 IDW con Potencia igual a 2. Fuente ARCGIS.

Se puede observar que cuando la potencia es de valor 2 tenemos unos valores más suavizados y próximos al punto datado más cercano.

Matemáticamente la expresión sería la siguiente:

$$x_p = \frac{\sum_{i=0}^n \left(\frac{x_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (2.3)$$

Donde tenemos que:

- x_p : es el valor que queremos calcular en ese punto y que desconocemos.
- x_i : es el valor de uno de los puntos de los que disponemos previamente.
- d_i : es la distancia entre el punto que queremos calcular y el punto del que disponemos con información.

- p : es la potencia de la interpolación y quien define el peso de los puntos con los que se calcula la iteración.

La distancia d_i que tiene cualquier punto satelital al punto a determinar se calcula de la siguiente forma.

$$d_i = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (2.4)$$

- d_x : es la distancia en el eje de coordenadas hasta el punto.
- d_y : es la distancia en el eje de ordenadas hasta el punto.
- d_z : es la diferencia de altura hasta el punto.

En el programa ArcMap dichos parámetros de cálculo vendrán fijado por:

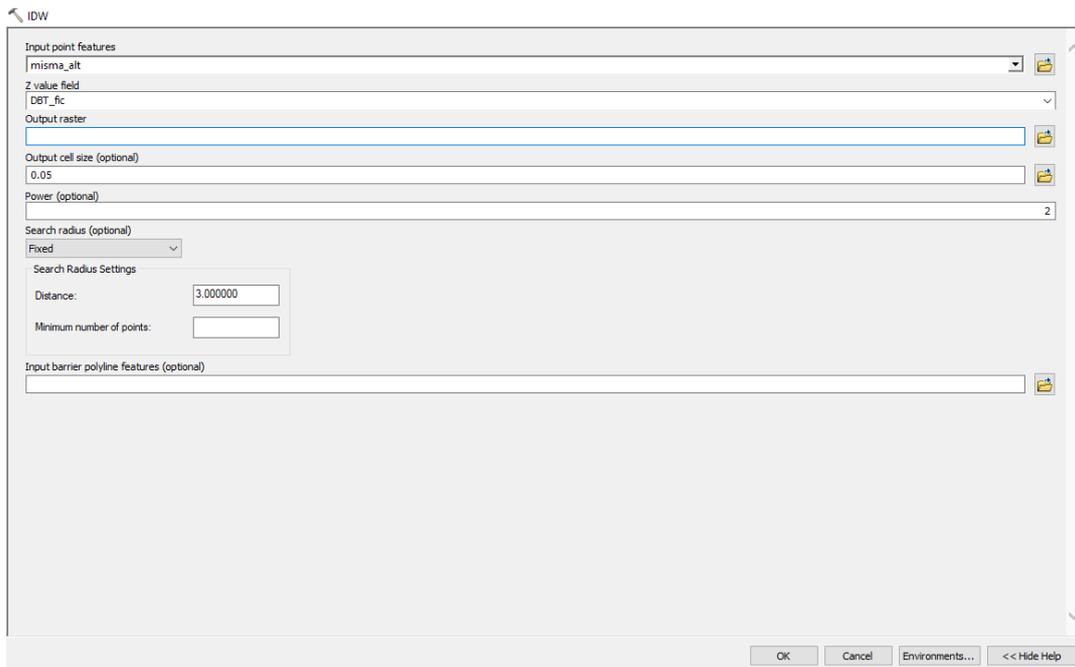


Figura 19 Interfaz de la herramienta IDW de ArcMap. Fuente Propia.

- **Input Point features:** Donde se encuentra la capa de puntos de las estaciones que vamos a utilizar. En nuestro caso es una capa creada en la cota de 8 metros de todas las estaciones y sus valores contenidos en la Excel que creamos en los pasos anteriores.

- **Z value_field:** Nos indica la columna de la base de datos que se va a utilizar para calcular. En nuestro caso es el parámetro DBT_f .
- **Output Raster:** Debemos introducir donde debe guardarse el nuevo Raster que se va a crear en este proceso.
- **Output Cell Size:** Si queremos le podemos dar el tamaño de celda para que la representación sea más fina cuanto más bajo es el valor.
- **Power:** Es la potencia que hemos mencionado cuando explicamos el IDW. Lo aconsejable siempre es entre 2 y 3. Nosotros elegimos la potencia igual a 2 después de comprobar la suavidad del contorno creado.
- **Search Radius:** Aquí el programa nos deja elegir si queremos darle nosotros unos valores Fijos (Fixed) o la posibilidad de que el programa vaya modificando esos valores (Variable). Elegimos FIXED, explicaremos a continuación porque se ha tomado esta decisión.
- **Distance:** Es la distancia máxima en la que puede buscar puntos de estaciones. Dichos valores vienen en grados longitudinales terrestres. El valor propuesto es 3.
- **Minimum numbers of points:** Si en vez de un radio fijo se prefiere que se busque un mínimo de puntos se podría especificar y la distancia iría cambiando.

Como hemos comentado previamente elegimos que sean valores fijos por nosotros para tener mayor control de la interpolación. Previamente realizamos un estudio de distancias entre las estaciones meteorológicas que tenemos. Determinando que cogiendo una resolución para IDW de Radio Fijo igual a 3°, que equivale a unos 300 km. Comprobamos gracias a la tabla que crearemos en Excel que tenemos al menos dos estaciones en ese radio dentro de nuestro mapa.

Al iniciar la herramienta nos devuelve el siguiente mapeado. Donde incluimos también todas las estaciones meteorológicas que tenemos disponibles.

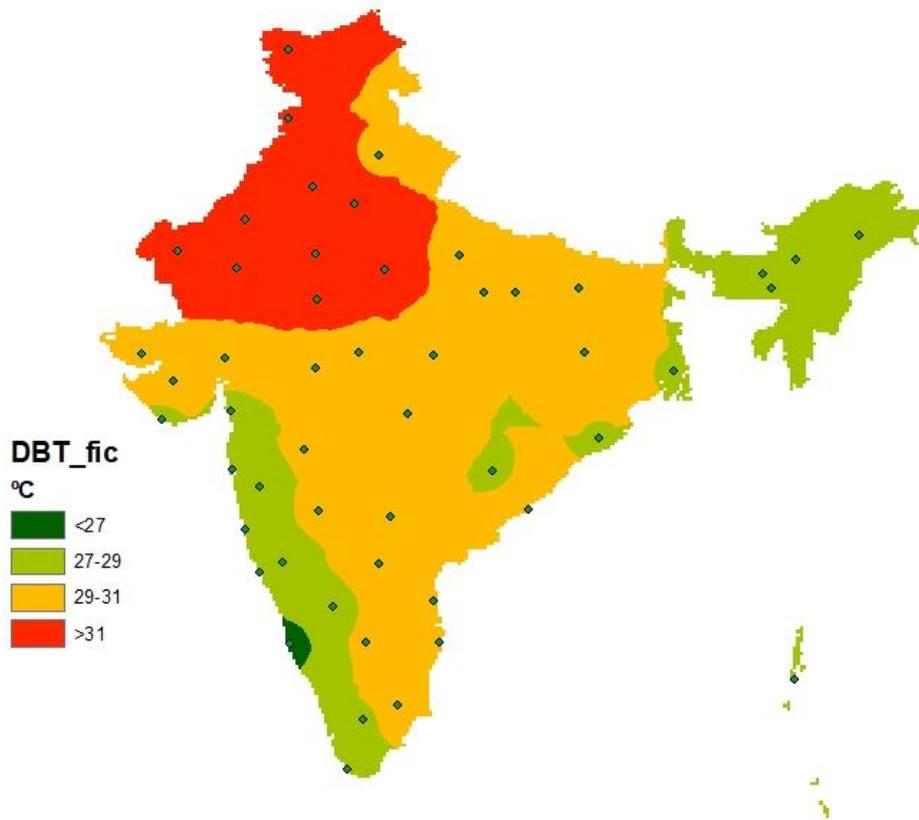


Figura 22 Mapa de DBT no correlacionando la cota. Se añaden las estaciones. Fuente Propia.

Aún este mapa no contempla la dependencia de la temperatura en función de las cotas y por tanto habrá que dar otro paso más.

2.3.2. Mapeado de DBT con dependencia de Altura

En este paso deberemos tener previamente un archivo del programa ArcMap que contiene todas las elevaciones de la región de India, este archivo se denomina DataRaster y contiene información digital de la zona mapeada en forma de píxeles de información. Es comúnmente utilizado en sin fin de programas y aplicaciones digitales.

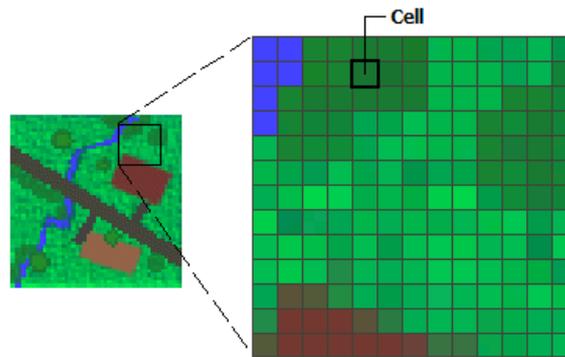


Figura 23 Ejemplo de Imagen DEM. Fuente ARCGIS.

El DataRaster (DEM) que nos ocupa a nosotros tendrá la información de la altura respecto el nivel del mar (Figura).

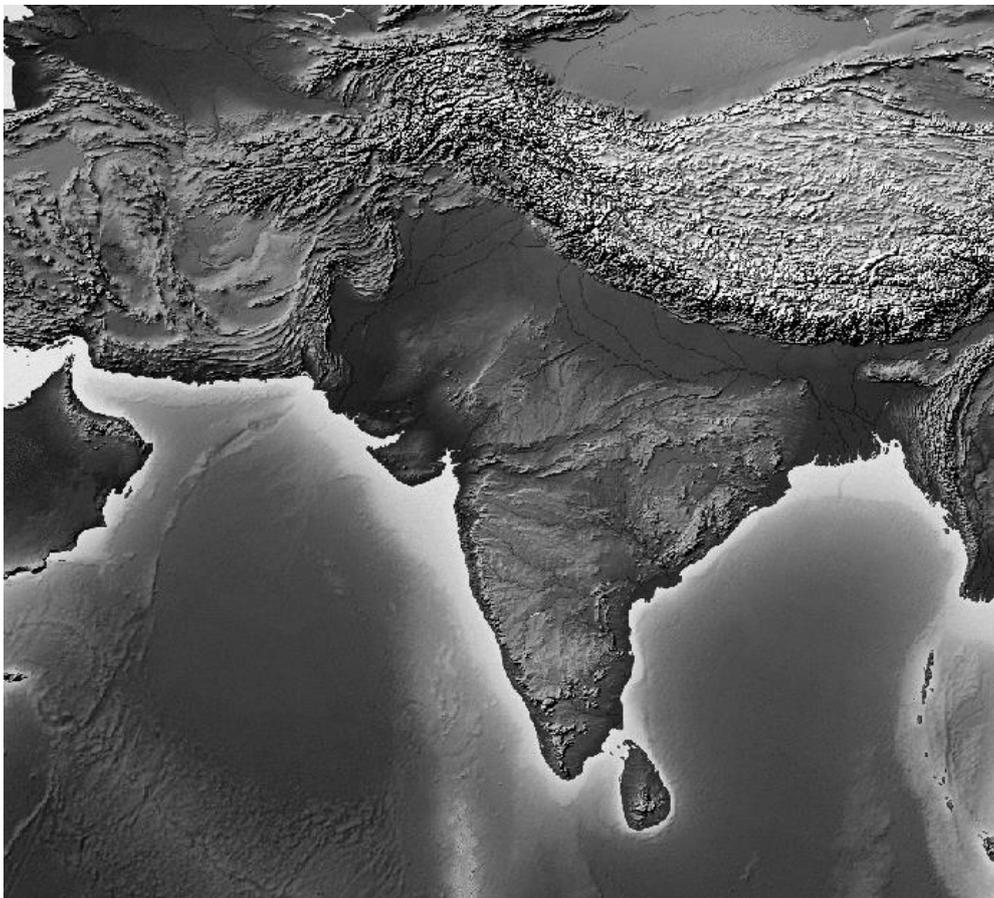


Figura 24 Ráster de Elevaciones de la Región de India y Suroeste Asiático

En realidad el paso que hay que dar ahora es prácticamente el inverso que hemos realizado antes cuando convertimos todos los DBT en DBT_f para crear un mapeado a

una misma altura. Ahora el dato de temperatura que debemos cambiar en relación a la altura será el mapeado entero.

Esto se hace utilizando las ecuaciones siguientes:

$$DBT = DBT_f - 0.0061\Delta z \quad (2.5)$$

$$\Delta z = z - z_b \quad (2.6)$$

Donde ahora z vendrá dado por nuestro DataRaster de elevaciones.

En el ArcMap el paso a dar para introducir esta ecuación es crear un DataRaster nuevo con su herramienta *Raster Calculator*. Creamos un nuevo Raster de datos que tendrá, esta vez sí, la temperatura de bulbo seco en función de la elevación del terreno.

El Raster Calculator del programa ArcMap tiene la siguiente estructura:

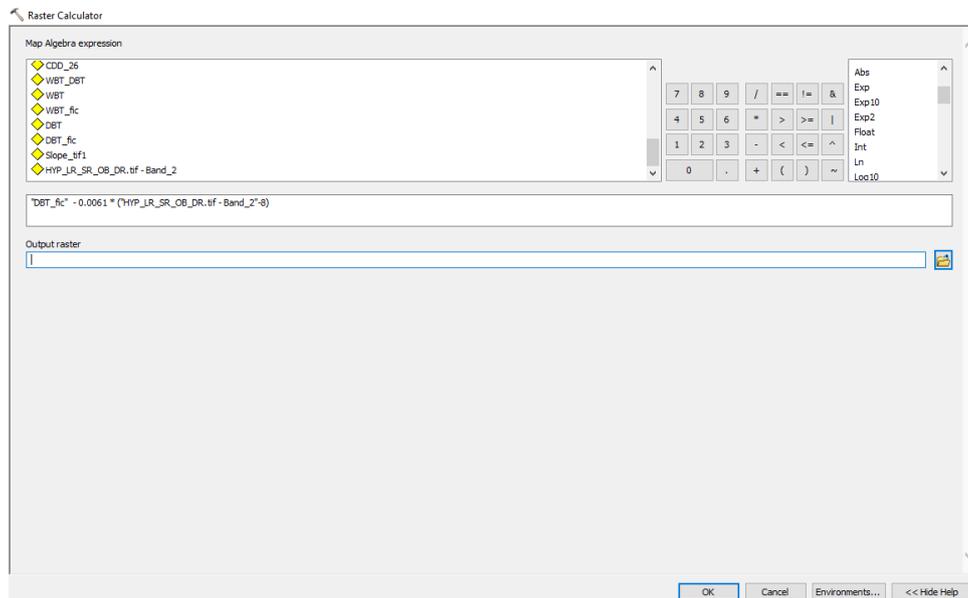


Figura 25 Interfaz de la herramienta Raster Calculator de ArcMap. Fuente Propia.

Donde se debe crear la ecuación que relaciona la altura y la temperatura de bulbo seco con los datos que están dentro del programa.

Se puede observar que contiene la siguiente ecuación:

$$"DBT_fic" = 0.0061 * ("HYP_LR_SR_OB_DR.tif - Band_2" - 8) \quad (2.7)$$

Donde:

- "*DBT_fic*": Equivale a DBT_f y las unidades son °C.
- ("*HYP_LR_SR_OB_DR.tif - Band_2*" - 8): Equivale a (2.6) donde z se define con el Raster y z_b viene prefijado a 8 metros de altura.

Al crear el nuevo mapeado se percibe notablemente el cambio en algunas zonas comparándola con el mapeado de DBT_f .

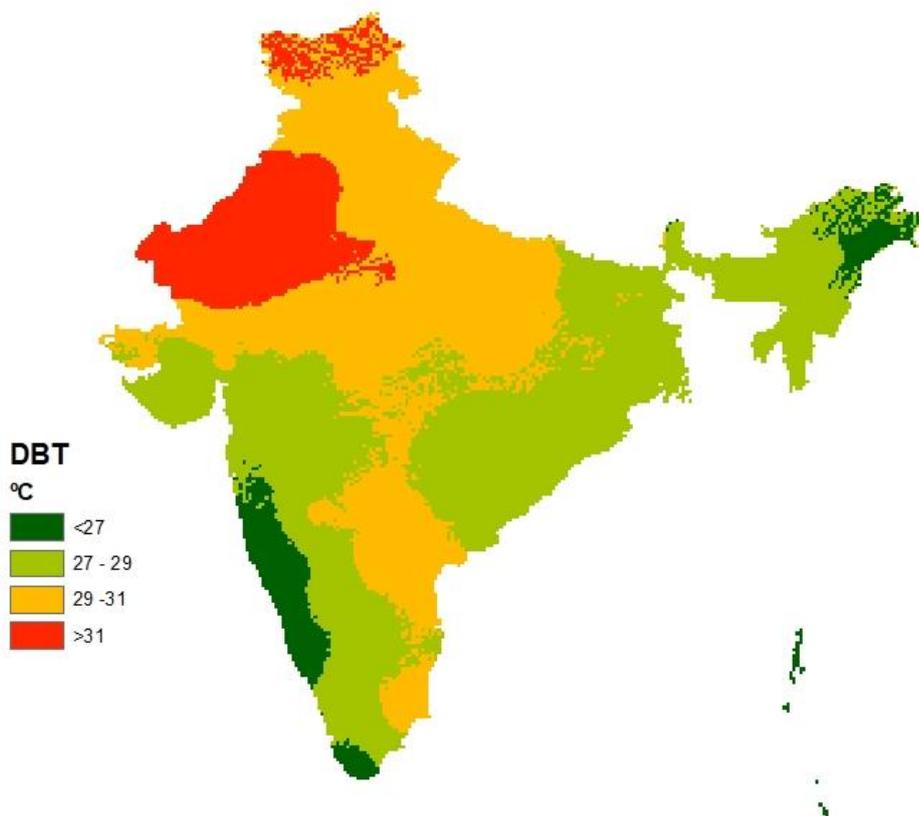


Figura 26 Mapa de DBT en función de la cota de cada punto del mapa. Fuente Propia.

Simplemente con este mapa podemos ver aproximadamente la semejanza con las zonas climáticas de Köppen pero con pequeñas excepciones creadas por los cambios de altitud y lo reflejado en las estaciones meteorológicas más cercanas.

2.3.3. Creación del parámetro WBT_f y su mapeado

Al igual que hicimos con DBT_f tendremos que seguir los mismos pasos de creación de WBT_f a partir del WBT de las estaciones meteorológicas de las que disponemos de la siguiente correlación:

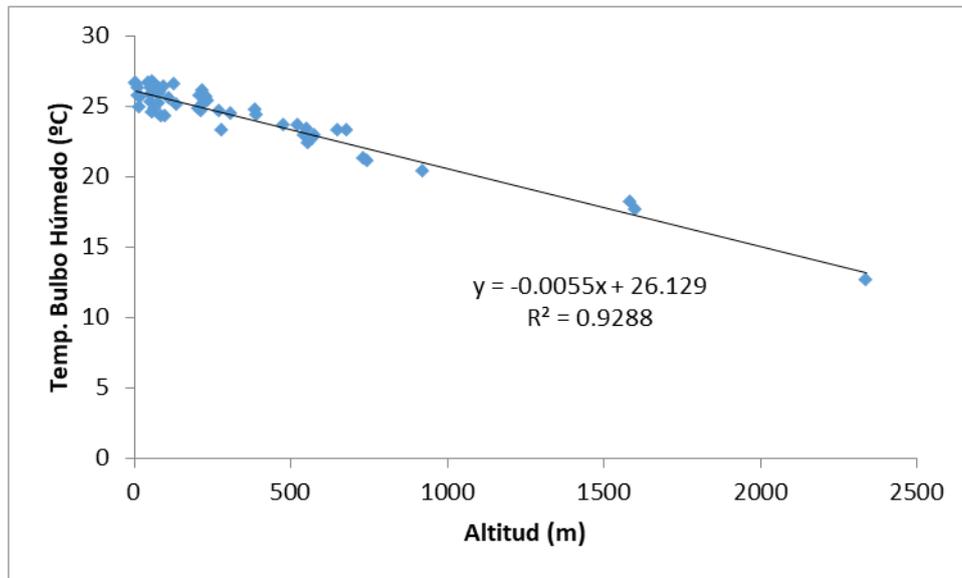


Figura 27 Correlación de la WBT y la Altura. Fuente Propia.

Con las consiguientes ecuaciones lineales:

$$WBT_f = 26.129 - 0.0055\Delta z \quad (2.8)$$

$$\Delta z = z - z_b \quad (2.9)$$

Donde tenemos que:

- WBT_f : Es la Temperatura de Bulbo Húmedo Estimada para una cota y su valor se dará en °C.
- Δz : Es el parámetro de altura o cota de cada punto que queramos calcular respecto a una altura base. Siguiendo la siguiente formula (2.9).

En la cual:

- z : Es la altura del punto que se está calculando
- z_b : Es la altura base que implementamos para tener una referencia, que en nuestro caso es 8 metros.

Una vez transformada todas las estaciones a cota de 8 metros de altura sobre nivel del mar procedemos a la creación del mapeado con la interpolación IDW. En este caso y los consiguientes utilizaremos los mismos datos de potencial, resolución y radio que en el caso de DBT_f . Aunque cambiaremos el $Z\ value_field$ por el WBT_f para calcular en esta ocasión la temperatura de bulbo húmedo a cota 8 metros en toda India.

Quedando en esta ocasión el siguiente mapeado:

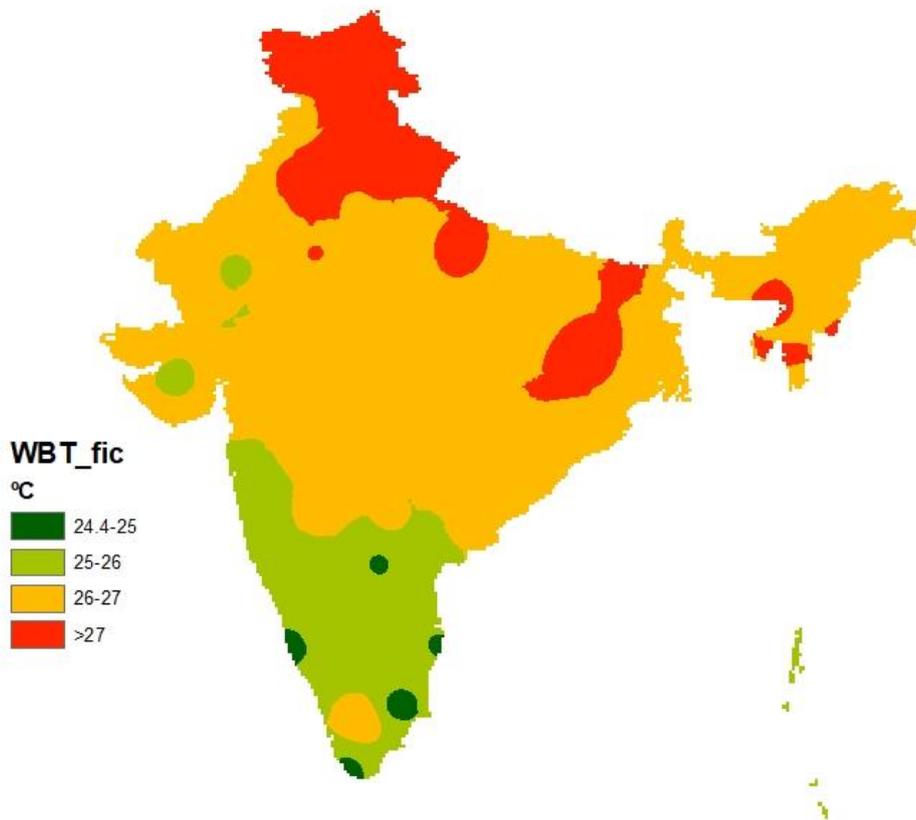


Figura 28 Mapa de WBT en India con todos los puntos al mismo nivel. Fuente Propia.

Podemos denotar aquí una influencia más elevada de los puntos satélites al hacer la IDW pero esta no será nuestra solución final debido a que nuestra relación se divide en dos pasos para que no determine completamente la cercanía de las estaciones el mapeado sino que tenga una relación también con la altura.

2.3.4. Creación del Mapeado WBT de India

Utilizamos ahora la fórmula siguiente en el *Raster Calculator* para crear un nuevo DataRaster que contenga el mapeado de WBT.

$$WBT = WBT_f - 0.0055\Delta z \quad (2.10)$$

Quedando de la siguiente forma.

$$"WBT_fic" = 0.0055 * ("HYP_LR_SR_OB_DR.tif - Band_2" - 8) \quad (2.11)$$

Donde:

- "*WBT_fic*": Equivale a WBT_f y las unidades son °C.
- ("*HYP_LR_SR_OB_DR.tif - Band_2*" - 8): Equivale a $\Delta z = z - z_b$ donde z se define con el Raster de elevaciones y z_b viene prefijado a 8 metros de altura.

Al crear este nuevo mapeado nos podemos dar cuenta del cambio en algunas zonas comparándola con el mapeado de WBT_f . Más particularmente donde los puntos de estaciones eran muy significativos.

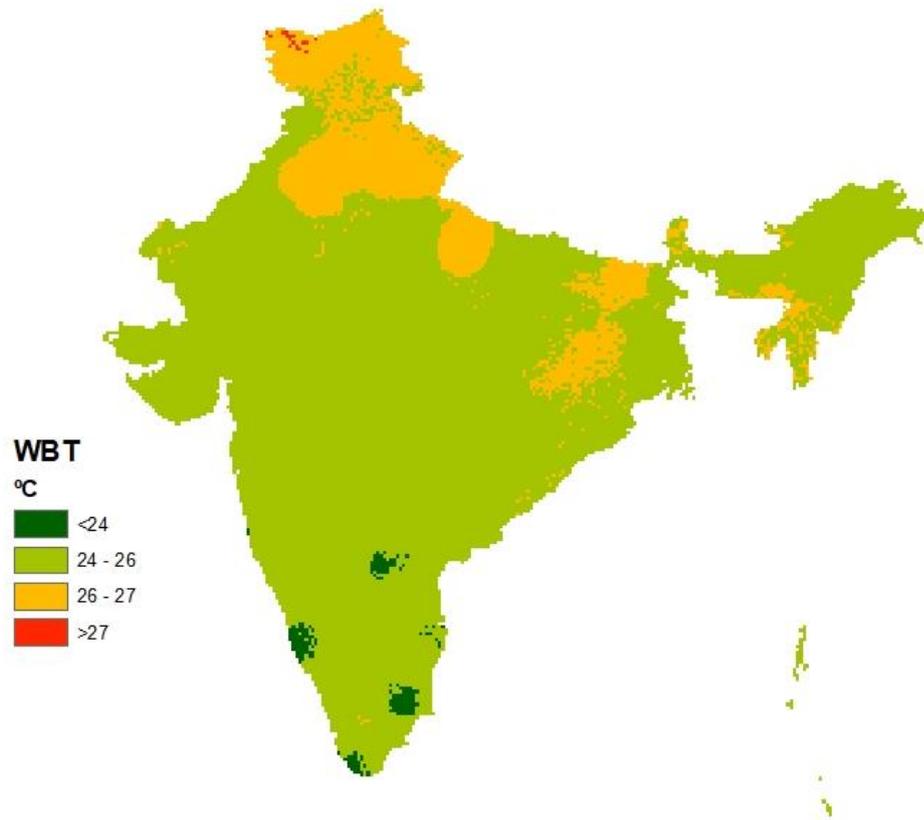


Figura 29 Mapa de WBT en India correlacionada con la Altura geográfica. Fuente Propia.

2.3.5. Mapa de Humedad Relativa (%) en India

Para la Humedad Relativa realizaremos los mismos pasos que realizamos antes. Las ecuaciones de correlación con la altura y la gráfica son las siguientes:

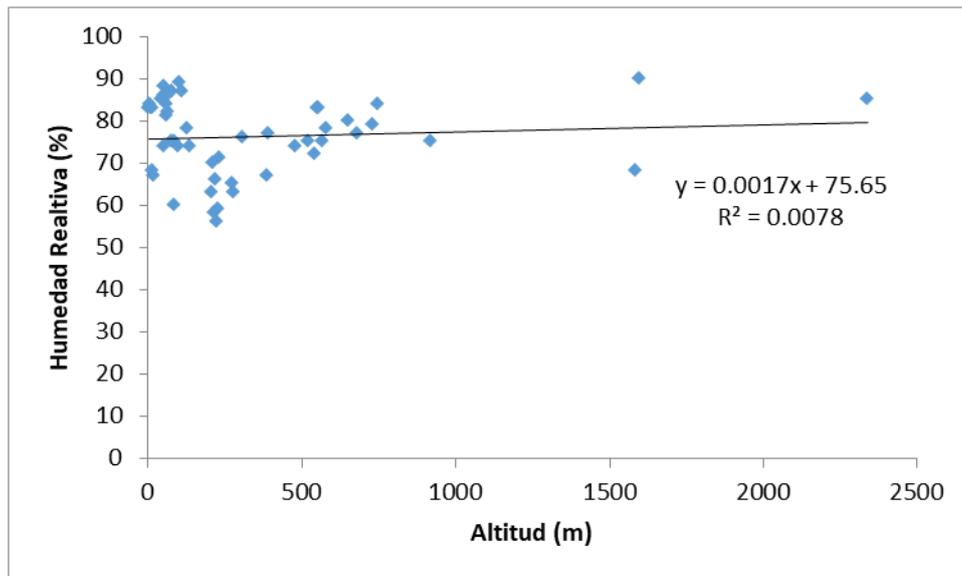


Figura 30 Correlación entre Humedad Relativa y Altitud. Fuente Propia.

$$HR_f = 75.65 - 0.0017\Delta z \quad (2.12)$$

- Δz se descompone en la formula (2.9).

En esta ocasión la dispersión de los datos es demasiado grande y se cometerían muchos errores dado que R^2 tiene un valor muy bajo. Por tanto se decide crear el mapa de Humedades Relativas directamente con los datos proporcionados por ISHRAE.

El mapa se crea con la interpolación IDW con los datos que ya hemos prefijado para los otros casos y con el parámetro Z value_field indicando el valor de HR en la base de datos de las estaciones meteorológicas que poseemos.

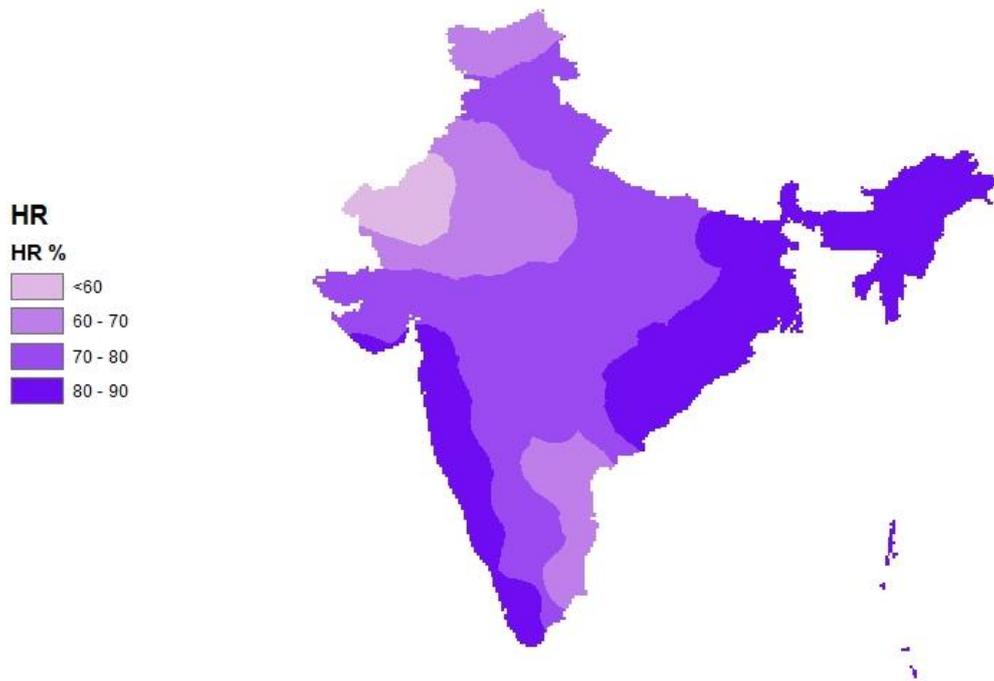


Figura 31 Mapa de Humedad Relativa en India. Fuente Propia.

2.3.6. Mapa de Precipitaciones (mm/m2)

Para las Precipitaciones vamos a crear tres mapas mediante el método IDW directamente debido a que las precipitaciones no se reflejan con una dependencia de la altura, aunque indirectamente se percibe una relación.

Crearemos en primer lugar un mapa de precipitaciones para los meses de Abril a Septiembre utilizando simplemente los datos de precipitaciones en esos meses y realizando un mapeado con el IDW de ArcMap. Quedando de la siguiente forma:

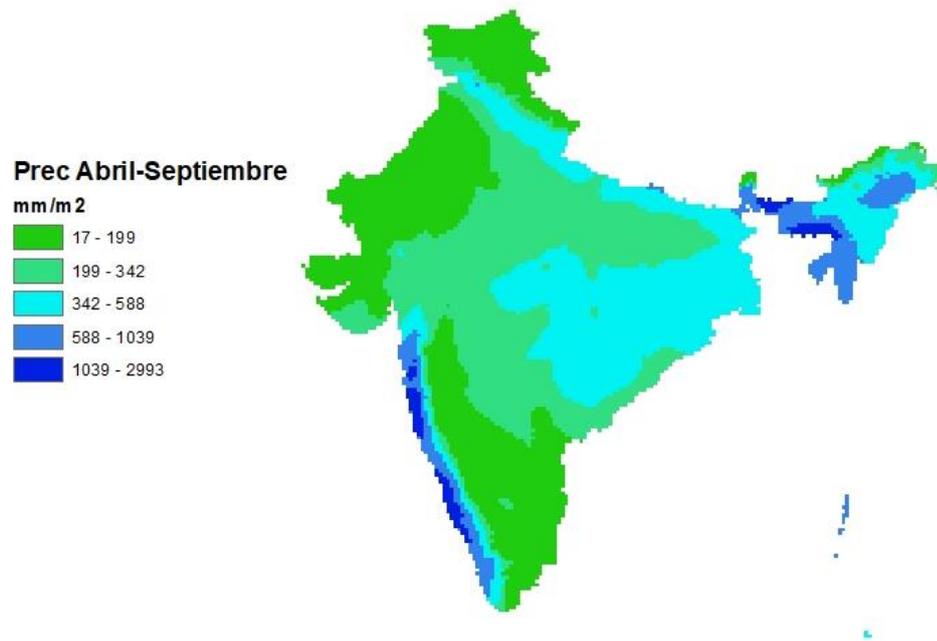


Figura 32 Mapa de precipitaciones acumuladas entre los meses de Abril a Septiembre. Fuente Propia.

Podemos observar que en estos meses se establecen los monzones en la costa oeste de India. El mapeado de precipitaciones de Octubre a Marzo es el siguiente:

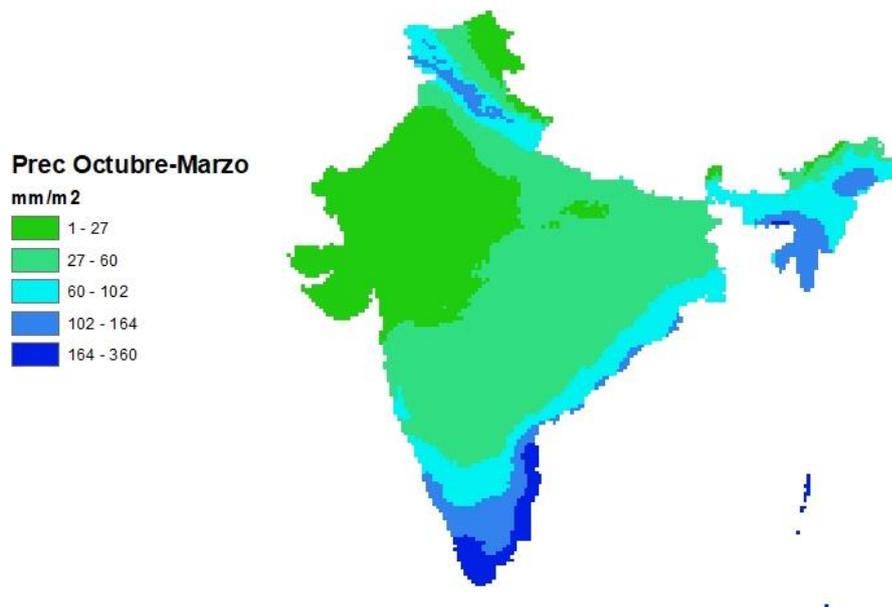


Figura 33 Mapa de precipitaciones acumuladas entre los meses de Octubre a Marzo. Fuente Propia.

En estos meses se percibe un aumento de lluvias en el Sur y Este de India. Se observa fácilmente que de Abril a Septiembre se concentran las lluvias con mayor volumen de agua por metro cuadrado. Quedando el Mapa de Precipitaciones Anual de la siguiente forma:

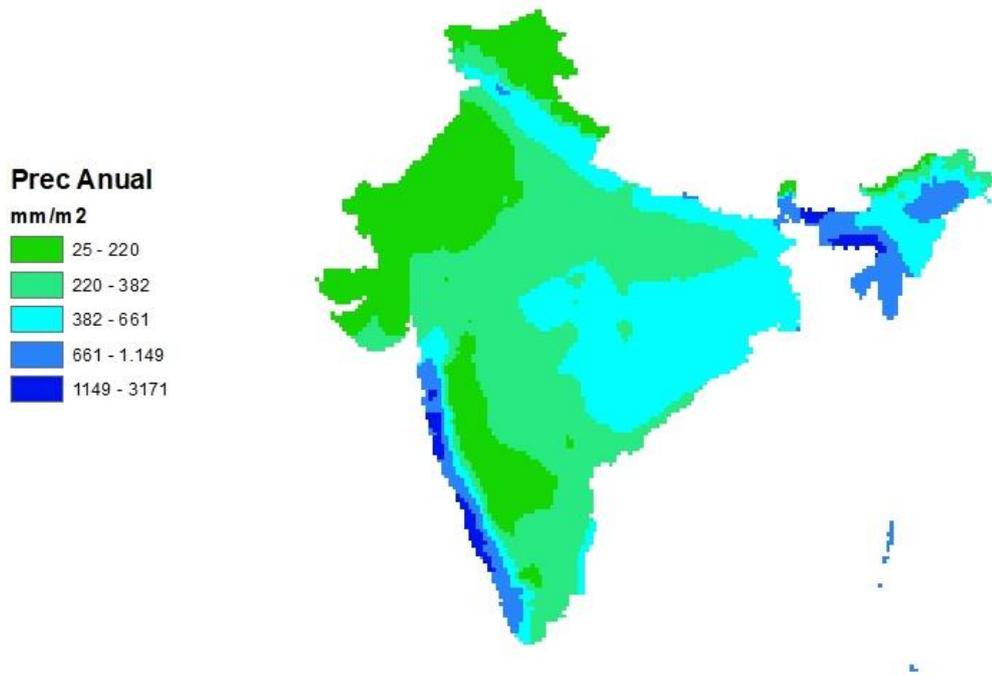


Figura 34 Mapa de precipitaciones acumuladas anuales. Fuente Propia.

Todos estos DataRaster están en Precipitaciones Acumuladas en mm/m². Por tanto se podría conseguir calcular teóricamente un acumulador de agua de lluvia para un edificio, como veremos más adelante.

2.4. CUARTO PASO: MAPEADO DE APLICABILIDAD DEL PDEC

Nuestro objetivo es crear un mapa de aplicabilidad que se base en dos criterios principales.

El primer criterio de aplicabilidad es la diferencia de temperaturas entre el bulbo seco y el bulbo húmedo, siendo mejor cuanto mayor diferencia halla. El segundo criterio debe ser la diferencia entre la temperatura interior de referencia, que marcaremos como 26°C, y la temperatura de bulbo húmedo.

Estos dos criterios deberán transformarse en clasificaciones por rangos para facilitar la creación de una tabla de valores de aplicabilidad.

MSP	DBT_WBT (%)				
	°C	0-2	2-4	4-7	>7
i26_WBT (%)	0-2				
	2-4				
	4-8				
	8-10				
	10-27				

Tabla 3 Tabla de Valores y Rangos para la Clasificación de la Aplicabilidad. Fuente Propia.

Por tanto habrá que obtener primero las variables con las que crearemos la tabla y por consiguiente el mapeado.

2.4.1. Mapa DBT-WBT en India

Para crear este mapa debemos utilizar la herramienta *Raster Calculator* del programa ArcMap. Dicha herramienta creará un mapeado bastante exacto de la diferencia de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

$$WBD = DBT - WBT \quad (2.13)$$

Donde:

- *WBD*: Se le conoce como Wet Bulb Depression, o diferencia de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, en °C.
- *DBT*: Es la temperatura de bulbo seco, en °C.
- *WBT*: es la temperatura de bulbo húmedo, en °C.

En el mapa clasificaremos las zonas por los valores de esa diferencia. Gracias a ArcMap podremos utilizar esta ecuación en toda la región de estudio gracias a la herramienta *Raster Calculator*, que ya vimos previamente.

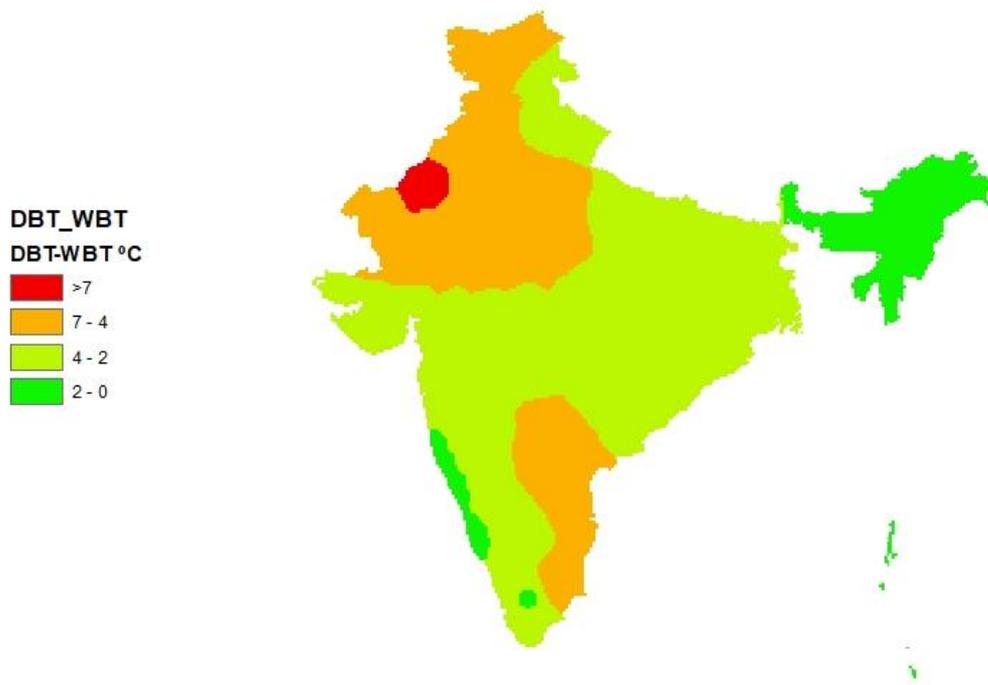


Figura 35 Mapa de la diferencia de DBT y WBT. Fuente Propia.

Esos rangos de temperatura son los valores con los que el PDEC puede trabajar. Es decir, en la zona Noroeste podemos disminuir la Temperatura del aire que entra desde el exterior hasta 7°C o más. Tan sólo con esto no podríamos determinar la necesidad de sistemas de PDEC en India, tendríamos que compararlos con más valores y situaciones.

2.4.2. Mapa i26-WBT en India

Con este mapa podremos apreciar realmente la posibilidad de rebajar temperaturas en el interior (i26), que tomaremos como 26°C, y la temperatura de bulbo húmedo (WBT).

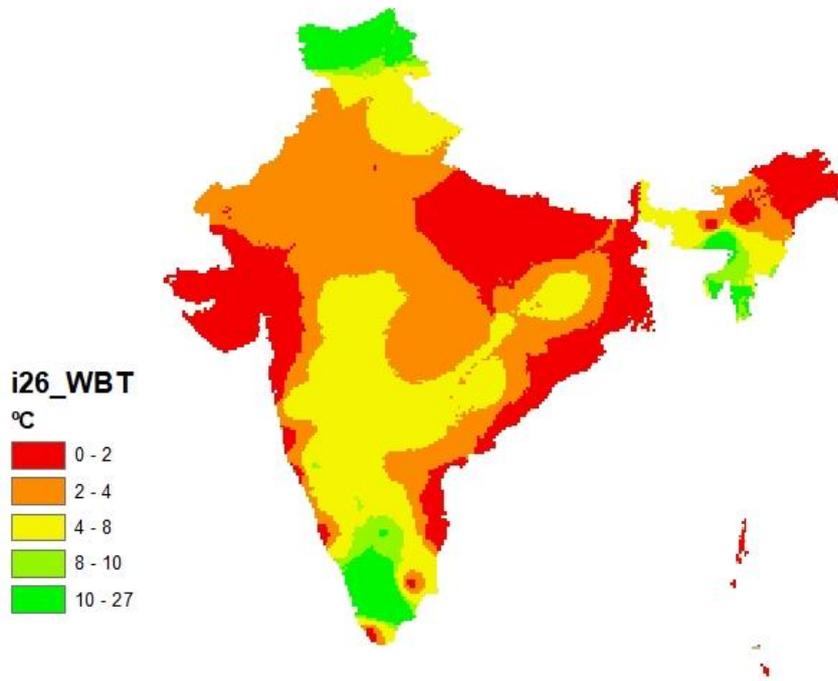


Figura 36 Mapa de la diferencia de 26°C con la WBT. Fuente Propia.

La zona de Roja de diferencia de temperaturas se encontrará en una situación crítica ante la inclusión de un sistema PDEC debido a que la temperatura media de bulbo húmedo (WBT) en esos meses no es inferior a 24°C y por tanto el calor absorbido en el flujo que emite el PDEC no es suficiente como para que haya un decremento en la temperatura interior.

Las demás zonas, si sólo tuviéramos esta información parecería más que lógico la implementación del PDEC en esas regiones de India. Pero debemos incrementar la información.

Para crear el Mapa de Aplicabilidad debemos primero reclasificar los mapas anteriores y darles el peso que tendrán en la unión de la información de las dos variables.

2.4.3. Reclasificación de Mapeados

Estos pasos son fundamentales realizarlos para obtener un mapa más fiable de aplicabilidad del PDEC en India. Para ello dentro del programa nos encontramos con la herramienta *Reclassify* donde deberemos poner los siguientes datos.

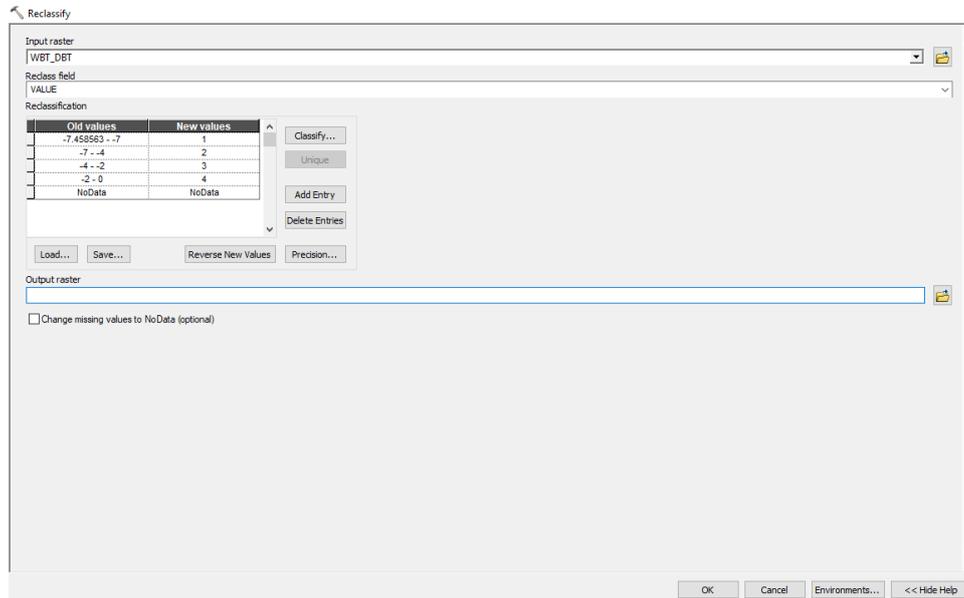


Figura 37 Interfaz de la herramienta *Reclassify* de ArcMap. Fuente Propia.

- **Input Raster:** Aquí deberemos poner el mapa que hemos creado con anterioridad y queremos reclasificarlo con otros valores. En nuestro caso los mapas de WBT_DBT y i26_WBT.
- **New Values:** Podemos introducir los nuevos valores que queremos tener para cada intervalo que escogimos cuando creamos los mapas.

Con esta herramienta se obtiene dos nuevos mapas, de los que tan sólo nos servirá para crear un mapa de aplicabilidad. Estos mapas tendrán valores adimensionales relacionados con el rango de división que creamos posteriormente para las variables climáticas con el fin de que se puedan utilizar en la tabla conjunta que vimos anteriormente.

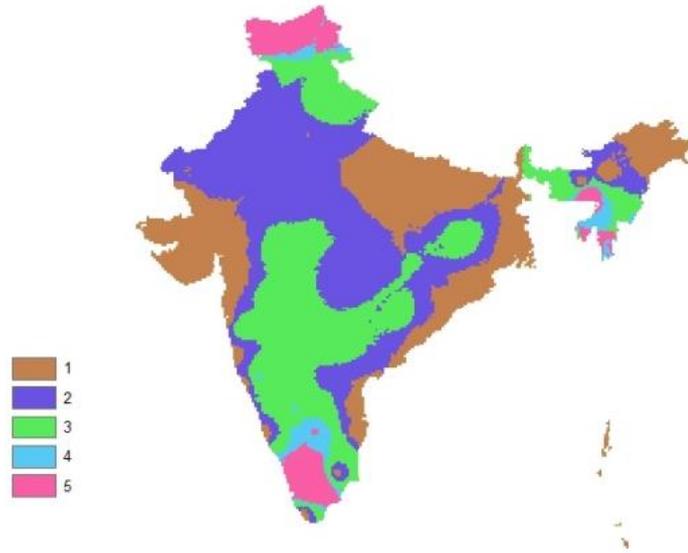


Figura 38 Reclasificación del Mapa i26-WBT. Fuente Propia.

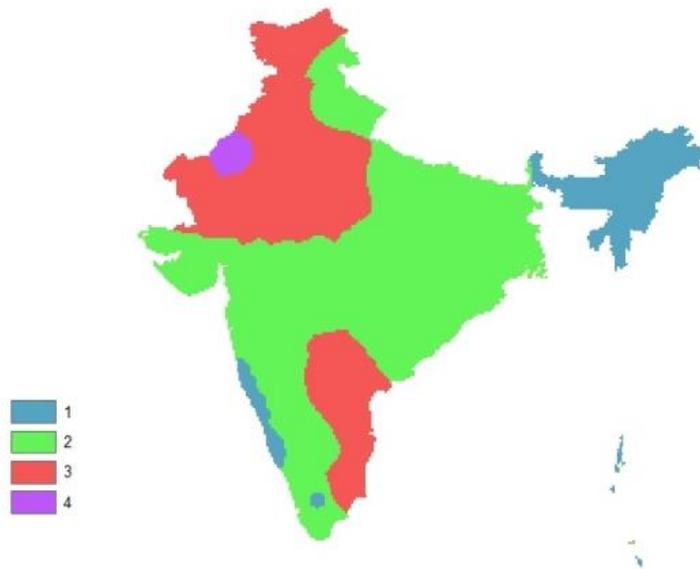


Figura 39 Reclasificación del Mapa DBT-WBT. Fuente Propia.

2.4.4. Creación del Mapa de Aplicabilidad mediante el MSP

Al crear el mapa de aplicabilidad con el Método de la Suma Ponderada (MSP) lo que hacemos realmente es introducir el factor de peso en nuestra unión de mapas bases que serán imprescindibles para determinar la Aplicabilidad del PDEC en India.

La finalidad de este método es conseguir que uno de los factores que se suman pueda tener más importancia que otros, o darle más credibilidad incluso. Esto se realiza

cuando el peso de la diferencia de temperatura entre el interior a 26°C y la temperatura de bulbo húmedo sea un valor distinto al peso de la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo. Creando una unión que formará el mapa de aplicabilidad del PDEC y tendrá la distribución representada en la siguiente tabla.

En estudios previos a otros países el peso de estas dos variables siempre ha sido el mismo para ambos. Es decir que si hiciéramos el Método de la Suma Ponderada tendríamos que poner que:

$$MSP_{Apply} = i26_WBT \times \gamma_i + DBT_WBT \times \gamma_d \quad (2.14)$$

Donde:

- **MSP_{Apply}** : Es la nueva variable que obtendremos que nos dará la Aplicabilidad del PDEC.
- **$i26_WBT$** : Es la variable de temperatura interior menos temperatura de bulbo húmedo transformada previamente a valores adimensionales por rango.
- **DBT_WBT** : Es la variable de temperatura bulbo seco menos temperatura de bulbo húmedo transformada previamente a valores adimensionales por rango.
- **γ_i** : Factor de peso de la variable $i26_WBT$ donde $\gamma_i \in [0\% - 100\%]$.
- **γ_d** : Factor de peso de la variable DBT_WBT donde $\gamma_d \in [0\% - 100\%]$.
- También debemos restringir que

$$\gamma_d + \gamma_i = 100\% \quad (2.15)$$

En el caso de que los pesos fueran iguales, como en los otros estudios, tendríamos los siguientes valores.

- $\gamma_i = 50\%$ e $\gamma_d = 50\%$

Quedando los valores de dicha aplicabilidad de la siguiente forma.

MSP	DBT_WBT (50%)				
	°C	0-2	2-4	4-7	>7
i26_WBT (50%)	0-2	VERY LOW	VERY LOW	LOW	MEDIUM
	2-4	VERY LOW	LOW	MEDIUM	MEDIUM
	4-8	LOW	MEDIUM	MEDIUM	HIGH
	8-10	MEDIUM	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH
	10-27	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH	VERY HIGH

Tabla 4 Tabla de Valores de Aplicabilidad. Fuente Propia.

En ArcMap el Método de Suma Ponderada se realiza con la herramienta llamada *Weighted Sum* que se mostrará de la siguiente forma.

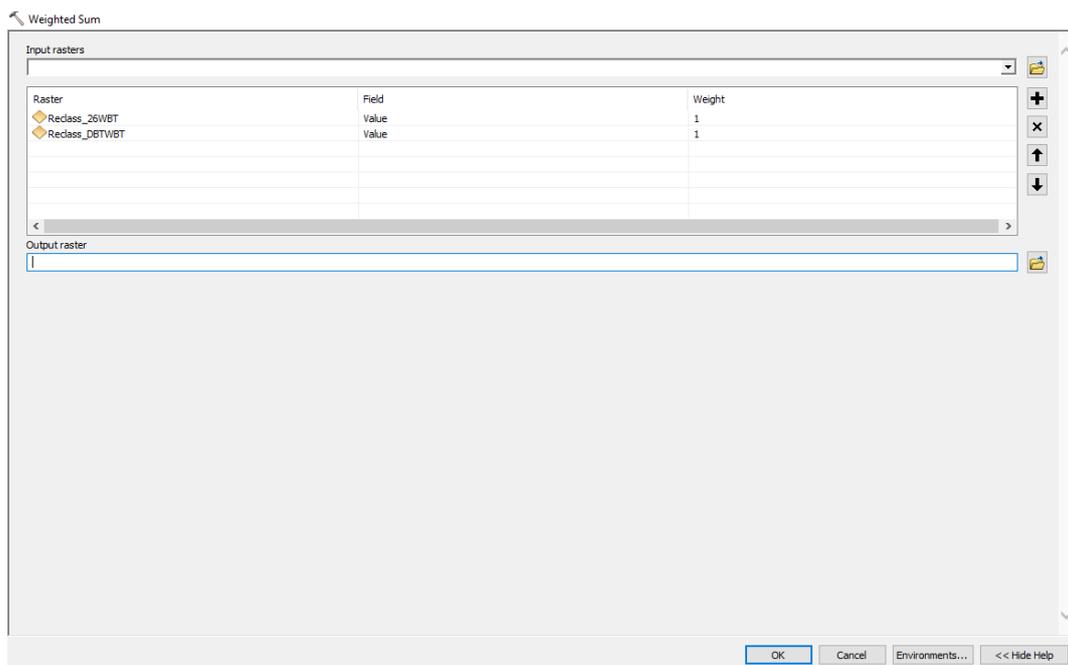


Figura 40 Interfaz de la herramienta Weighted Sum de ArcMap. Fuente Propia.

- **Input Rasters:** En esa pestaña desplegable deberemos elegir todos los mapas creados y reclasificados con anterioridad que queremos utilizar en esta “suma de valores ponderada”.
- **Weight:** Aquí es donde le vamos a dar el peso a nuestros datos iniciales para crear el mapa de aplicabilidad más conforme a nuestro criterio. Siendo 50 para los datos de i26_WBT y 50 para DBT_WBT.

Una vez realizado todos estos pasos hemos obtenido un Mapa de Aplicabilidad del PDEC que estará en función de los datos de la diferencia de la temperatura interior (i26) y la temperatura de bulbo húmedo y en función también de la diferencia entre la temperatura de bulbo seco (DBT) y húmedo (WBT). Previsiblemente tendrá una estructura de mapeado distinto a los anteriores, como podemos observar.

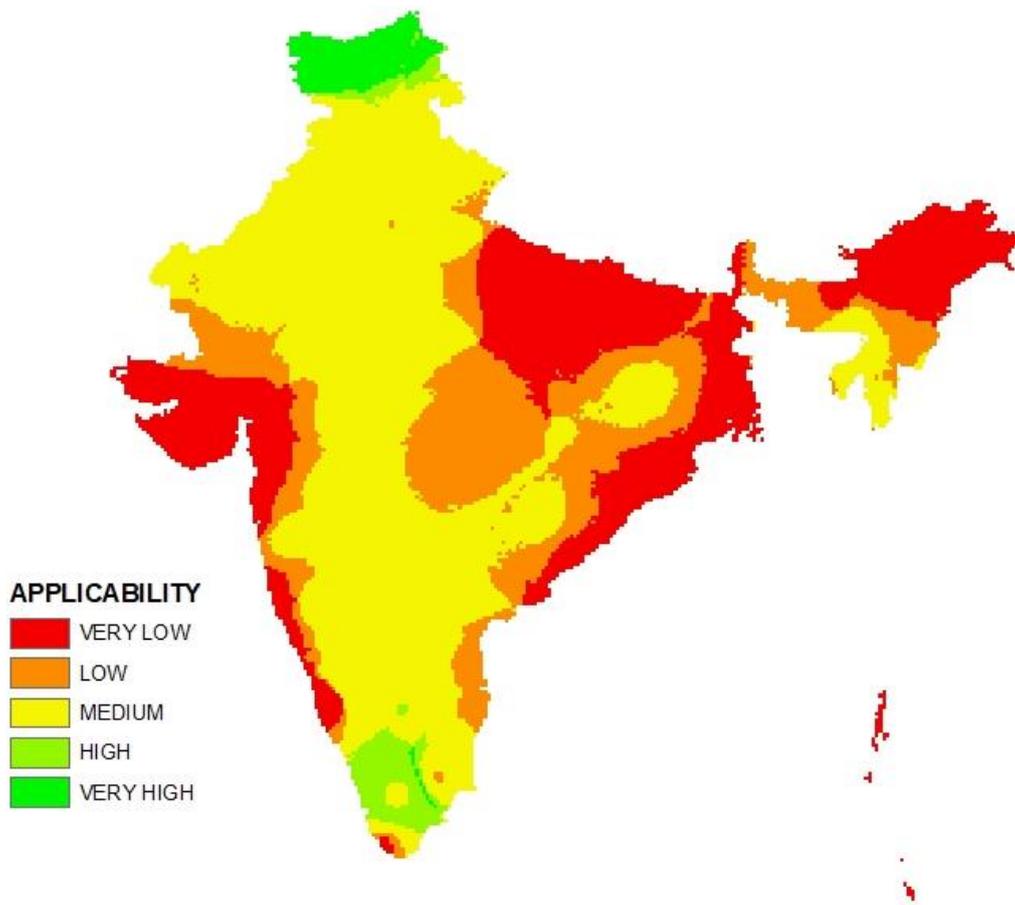


Figura 41 Mapa de Aplicabilidad del PDEC en India. Fuente Propia.

2.4.5. Mapa de Aplicabilidad de PDEC con mayor relevancia en DBT-WBT

En este punto vamos a explorar una nueva opción de ponderación. Esta consistirá en dar mayor peso a la diferencia de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

Esta distinción se basa en que realmente no podemos dar un peso equivalente a una diferencia que esté condicionada en función de una temperatura de confort (26°C) cuando realmente la elección de esa temperatura cuando estamos en climas donde predominan temperaturas mínimas medias al año de esos rangos o no muy alejados. En ese caso los usuarios no tendrán tantos problemas en adaptarlo a una temperatura más alta (28°C) si la temperatura del aire exterior está a 40°C. Esta hipótesis viene avalada por un estudio realizado en India (Indraganti, 2011).

Por tanto es más aconsejable dar un nivel alto de ponderación al funcionamiento del sistema PDEC que estará limitado por la diferencia de DBT y WBT. En esos rangos es donde el sistema puede crear esos decrementos de temperatura.

En estas premisas se han escogido por tanto los siguientes valores de ponderación.

- $\gamma_i = 30\%$ y $\gamma_d = 70\%$

Quedando por tanto la Tabla de Aplicabilidad de la siguiente forma.

MSP	DBT_WBT (70%)				
	°C	0-2	2-4	4-7	>7
i26_WBT (30%)	0-2	VERY LOW	LOW	MEDIUM	HIGH
	2-4	VERY LOW	LOW	MEDIUM	HIGH
	4-8	LOW	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH
	8-10	LOW	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH
	10-27	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH	VERY HIGH

Tabla 5 Tabla de valores de Aplicabilidad con MSP. Fuente Propia.

Para la creación del Mapa de Aplicabilidad usaremos como antes la misma herramienta, *Weighted Sum*. Eso sí habrá que modificar el siguiente parámetro:

- **Weight:** Aquí es donde le vamos a dar el peso a nuestros datos iniciales para crear el mapa de aplicabilidad más conforme a nuestro criterio. Siendo 30 para los datos de i26_WBT y 70 para DBT_WBT.

Una vez realizado estos pasos obtendremos el nuevo mapa de aplicabilidad del PDEC. Que es el que usaremos de aquí en adelante. Comprobaremos en siguientes capítulos que la elección del peso diferenciado es la más acertada.

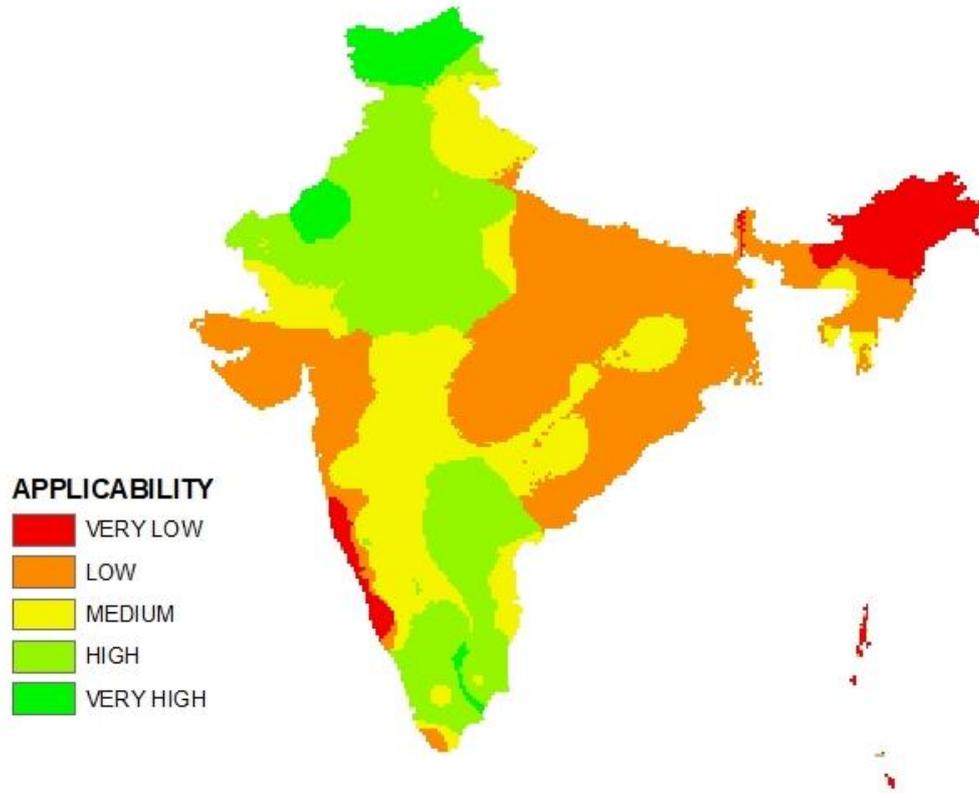


Figura 42 Mapa de Aplicabilidad del Sistema PDEC en India con MSP. Fuente Propia.

Podemos observar como en las zonas Norte-Noroeste y Sur de India se comprenden las mejores aplicabilidades del Enfriamiento Pasivo Evaporativo (PDEC). Como la zona bañada por el Mar Árabe tiene casi en su totalidad una aplicabilidad de este sistema bajo o muy bajo. Al igual que las regiones que se encuentran en el Golfo de Bengala y zona Nordeste que poseen niveles bajos o muy bajos. Las Islas de Andaman y Nicobar pertenecientes a India también tienen una muy baja aplicabilidad de este sistema, lo cual es fácilmente explicable debido a su alta concentración de humedad y temperaturas más suaves.

2.4.6. Mapa de Cooling Degree Days (CDD) en los meses de Verano en India

Debemos destacar ante todo que los CDD están calculados sobre la base de 26°C que sería la máxima temperatura que queremos tener en el interior para dar un buen

confort a los usuarios. Como explicamos previamente el indicar la temperatura interior con un valor fijo tiene desventajas ocasionadas por la apreciación del confort.

Para calcular los Cooling Degree Days hemos utilizado la siguiente formula:

$$CDD = \sum_{i=1}^N (\bar{T}_i - T_b) \times 24 \quad (2.16)$$

Donde:

- \bar{T}_i : Es la Temperatura Media de ese día.
- T_b : Es la Temperatura base que vamos a proponer, que suele ser 20°C pero utilizaremos 26°C en nuestro caso.
- N : Es el total de días donde la $\bar{T}_i > T_b$ y por tanto existe CDD. Nuestro rango de días estarán contemplados en los meses de verano, de Junio a Septiembre.

A continuación vamos a representar el Mapeado de CDD de India, aunque no estará representado en función de la cota de elevación al ser un dato meramente informativo. Dicho mapeado ha sido realizado mediante el Método de IDW con los mismos valores de distancias máximas que en los anteriores.

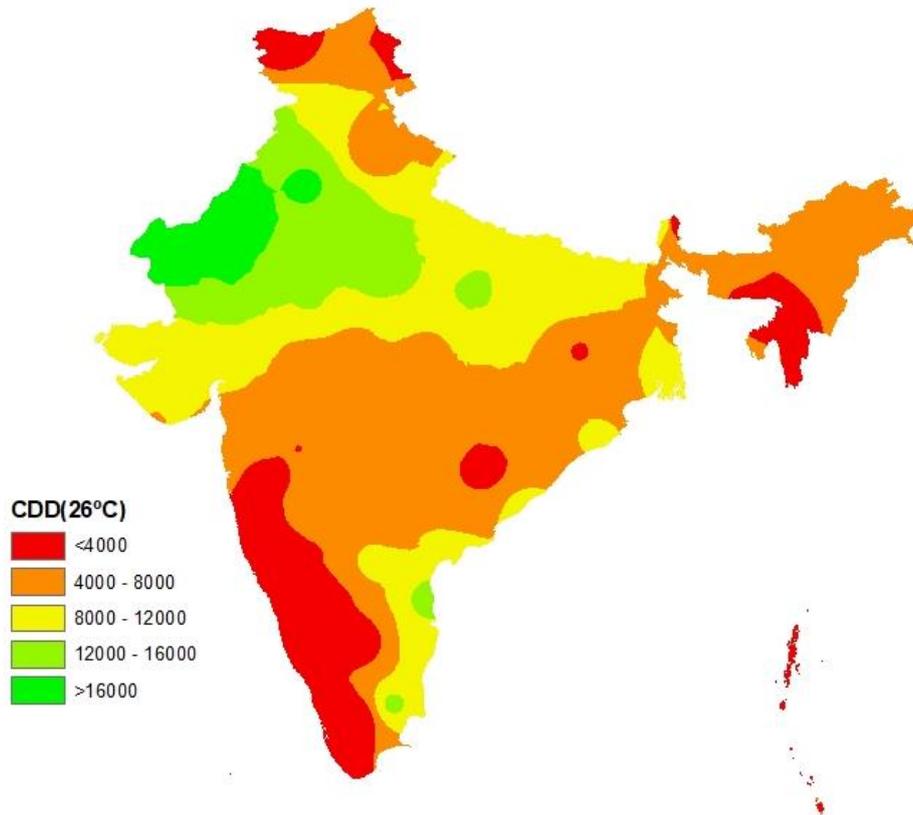


Figura 43 Mapa de CDD para los meses de verano en India. Fuente Propia.

Podemos observar el mayor peso que tienen las estaciones meteorológicas en el mapeado al no contar con la influencia de la altura. Aun así, nos servirá para reflejar la concordancia que tenemos en las zonas de muy alta y alta aplicabilidad que coinciden con CDD elevados.

Con toda esta información podemos constatar la importancia de crear previamente un estudio de las zonas donde se pretende implantar los distintos sistemas de mejora de confort. Determinando en nuestro caso que zona tendría una mayor aplicabilidad del PDEC.

2.5. ANALISIS DEL RECURSO HIDROGRÁFICO DEL SISTEMA PDEC

En este capítulo analizaremos los recursos disponibles en India para el sistema pasivo de enfriamiento evaporativo. Como es lógico el recurso más importante es el agua que será evaporado mediante rociadores al aire que entra en los habitáculos para conseguir un descenso de temperatura de ese flujo. Por tanto nos centramos en la búsqueda de este recurso.

2.5.1. Obtención del agua necesaria para los PDEC

Centrándonos en el agua que el sistema va a utilizar tendremos que determinar cuánto agua puede proporcionarnos un captador y que cantidad de agua debe ser obtenida por el sistema de agua sanitaria local. Podemos ver en el siguiente esquema como sería el sistema de forma simplificada.

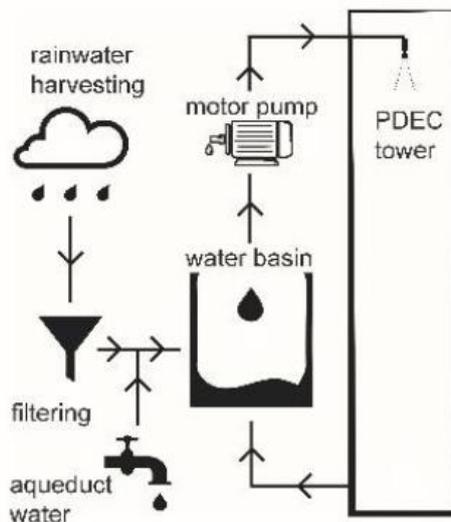


Figura 44 Esquema del sistema PDEC. (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017)

En este caso vamos a crear un mapa conjunto combinando el mapa de aplicabilidad del PDEC con los cuerpos de agua de India. Estos cuerpos de agua son lagos, ríos y riberas con afluentes de agua dulce. Esto determinará la facilidad de obtención de agua sanitaria de cada zona o región de India comparado con la posibilidad de poder aplicar el PDEC.

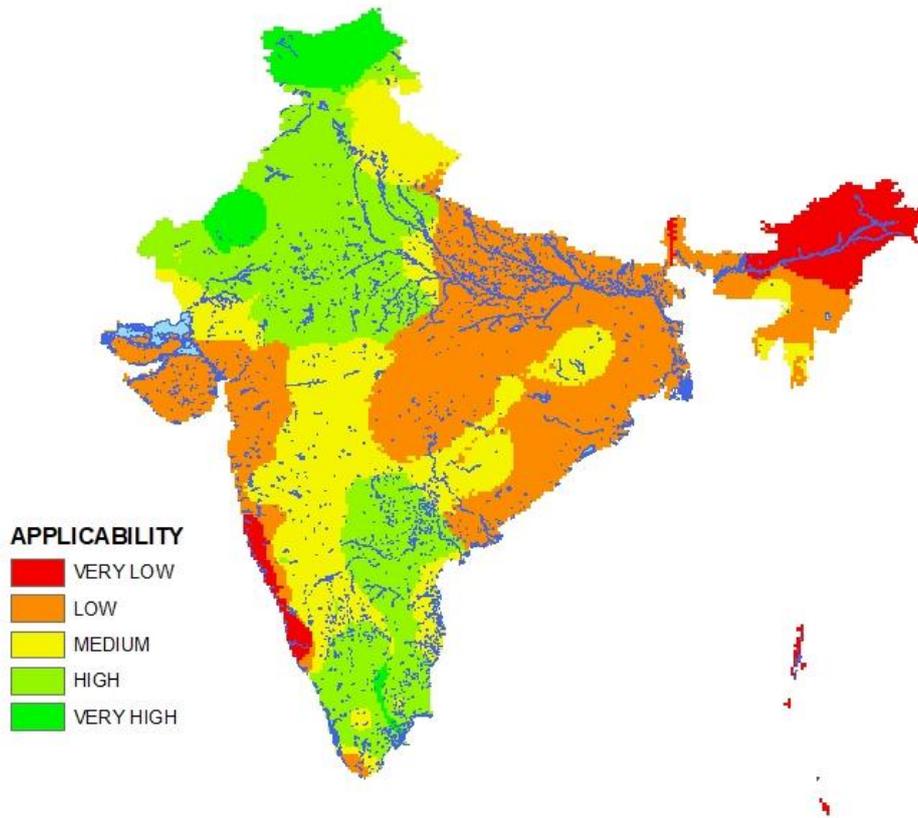


Figura 45 Mapa de Aplicabilidad del PDEC con los cuerpos de agua de India más importantes. Fuente Propia.

Se observa inmediatamente que la zona donde la aplicabilidad es más alta, situada al Norte y Noroeste, es la que más problemas de abastecimiento de agua puede tener. Esto es debido a que las altas temperaturas y los bajos índices de humedad relativa crean un clima más seco y árido en esas zonas.

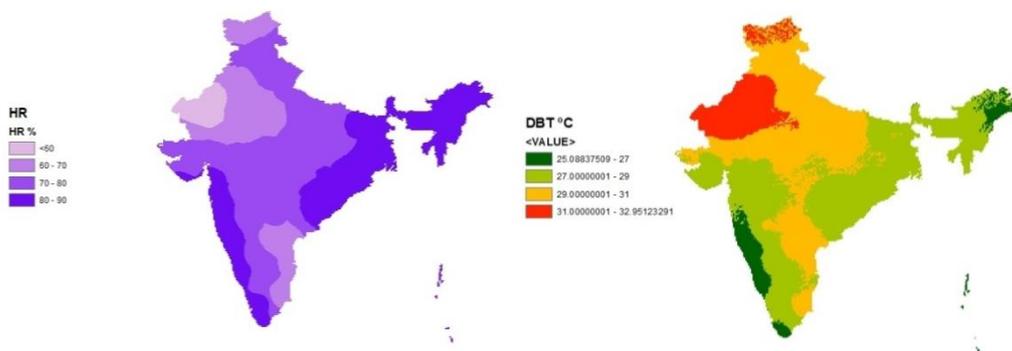


Figura 46 Mapas de HR y DBT en India. Fuente Propia.

A su vez esas mismas zonas necesitarán de más agua para llegar a la temperatura de bulbo húmedo deseado.

Basándonos en la siguiente gráfica que contiene la saturación de agua a cada temperatura podremos calcular cuál es el nivel máximo de agua introducido en cada zona de India para llevar desde una temperatura de bulbo seco en el ambiente a una temperatura de bulbo húmedo en el interior de la torre donde se absorberán todo el agua hasta el nivel de saturación.

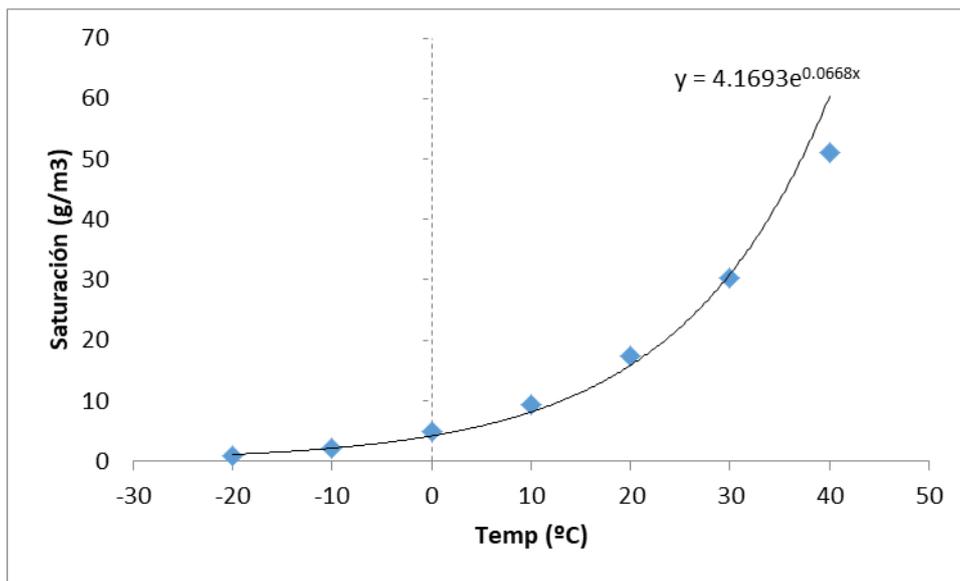


Figura 47 Relación de Temperatura y saturación de agua. Fuente Propia.

Obtenemos la fórmula para calcular a cualquier temperatura:

$$w_s = 4.1693 \times e^{0.0668 \times T_{DBT}} \quad (2.17)$$

,en (g/m³). Donde:

- w_s : es la cantidad de agua necesaria para llegar a la humedad relativa del 100% y que el ambiente esté saturado. Las unidades están en g/m³.
- T_{DBT} : Es la temperatura de bulbo seco del ambiente.

Si el agua saturada es para el 100% de Humedad Relativa, el agua que debemos aportar será en cada zona:

$$w_a = w_s \times (1 - RH) = 4.1693 \times e^{0.0668 \times T_{DBT}} \times (1 - RH) \quad (2.18)$$

Donde

- w_a : es el agua que hay que introducir en un m^3 de aire a esa temperatura y con esa RH.
- RH : es la Humedad Relativa de ese punto.

Deberemos ahora convertirlo en un mapeado con ArcMap mediante la herramienta *Raster Calculator* de la siguiente forma.

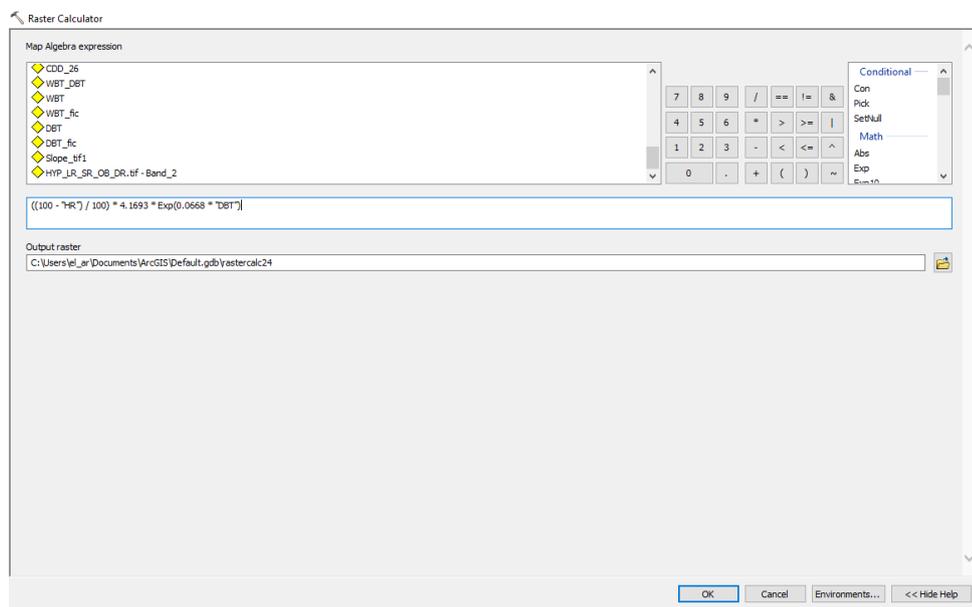


Figura 48 Interfaz del Raster Calculator en ArcMap. Fuente Propia.

Quando ejecutamos la herramienta nos entrega el nuevo mapa que contiene información de la cantidad de gramos de agua que necesitamos aportar por cada m^3 de aire exterior que entra en el edificio.

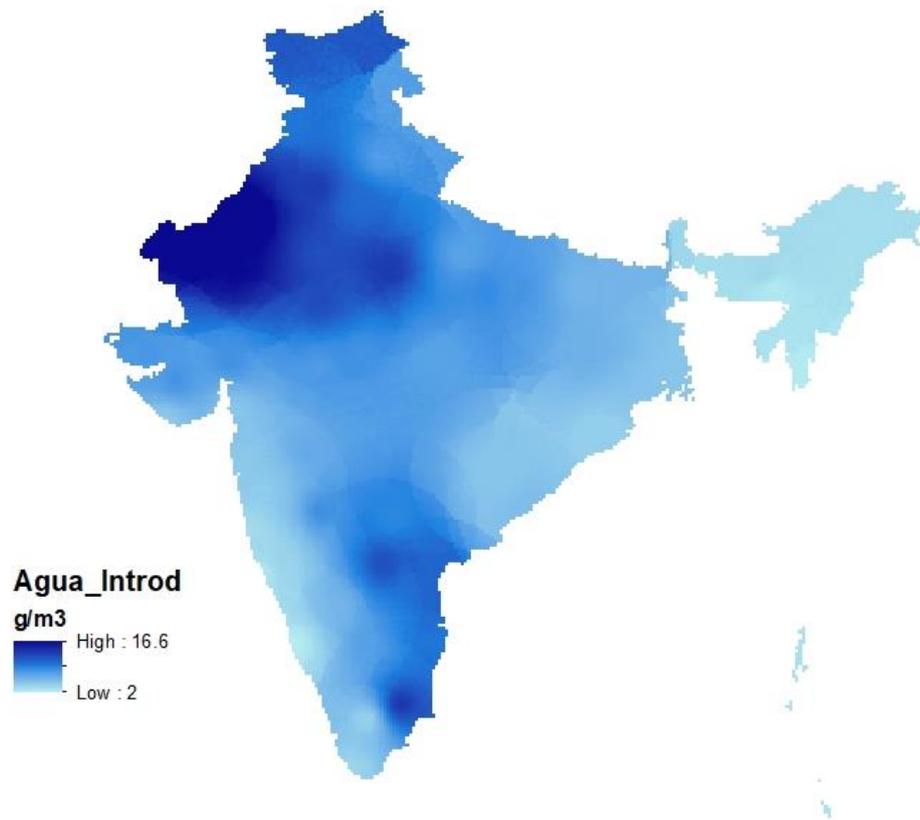


Figura 49 Cantidad de agua añadida por cada m³ de aire para llegar a la saturación. Fuente Propia.

Vamos ahora a transformar este dato y su mapa en un nuevo parámetro que nos dará el agua total que es necesario introducir por m² útil del edificio que queremos enfriar.

Algunos parámetros los fijaremos previamente:

- Altura Habitación: Es la altura de la zona por donde se proyectará el flujo de corriente saturado medido en m. Nosotros tomaremos 3 metros.
- Renovaciones por hora: Es la cantidad de aire del exterior que vamos a introducir dentro del habitáculo medido en h⁻¹. Que induciremos a 2 renovaciones/hora.
- Existe una recirculación del agua que emiten los rociadores y no se absorbe en el flujo de corriente.

Tomaremos como guía los datos utilizados en el artículo *Passive downdraught evaporative cooling system integration in existing residential building typologies: a case study* donde podemos observar las suposiciones previas que hemos hecho.

Por tanto para calcular el volumen de agua necesario por metro cuadrado tenemos que realizar la siguiente ecuación:

$$V_{wa} = \frac{w_a \times \bar{H} \times \bar{q}_e}{\bar{\rho}_w} \quad (2.19)$$

Donde:

- V_{wa} : Es el volumen de agua introducido total por metro cuadrado de superficie útil por hora. Las unidades estarán en l/m²h.
- w_a : Agua que hay que introducir en cada m³ de aire para que se sature.
- \bar{H} : Altura del habitáculo media, que será 3 metros en nuestro caso.
- \bar{q}_e : Caudal de entrada en renovaciones por hora, 2 ren/h para nuestro caso.
- $\bar{\rho}_w$: Densidad del agua a temperatura normal, que señalaremos como 1000 kg/m³ o 1000 g/l.

Creamos dicho mapeado con esta fórmula en el ArcMap con la herramienta *Raster Calculator* para crear un mapa que tiene como unidades de medida las del V_{wa} .

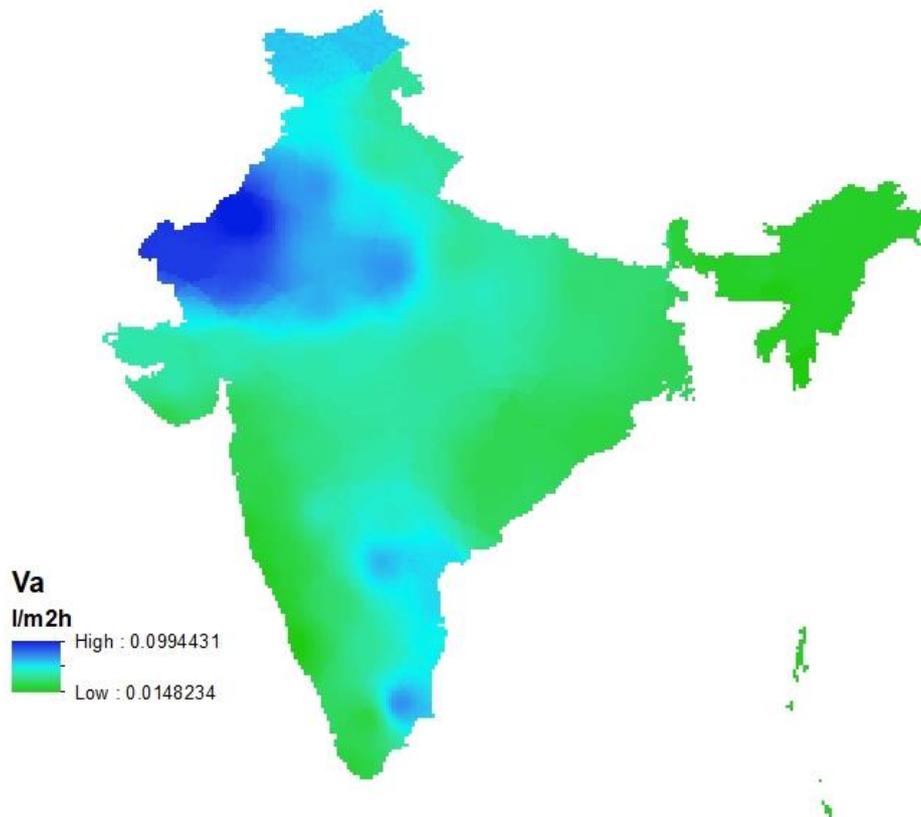


Figura 50 Volumen de agua añadida al flujo de aire de entrada por hora y m^2 útil. Fuente Propia.

Observamos que en la mayor parte de las zonas costeras el volumen de agua necesaria para saturar el aire que entra en nuestra torre de evaporación es del orden de 10 veces más baja que en la zona noroeste colindante a Pakistán. A su vez la posibilidad de acceder a agua es más complicada en esa zona.

Para resolver el dilema del uso de agua sanitaria en zonas de escasez hidrográfica podemos realizar un cálculo aproximado para la creación de un acumulador de lluvia en el edificio.

2.5.2. Diseño del Acumulador y Captador de Agua para el PDEC en India

Partiremos de unas definiciones previas para realizar el diseño de dicho acumulador.

1. Supondremos que las lluvias acumuladas para los meses de utilización serán calculadas con el año completo. Es decir el acumulador está siempre trabajando.

2. El acumulador de lluvia tendrá un aparato conectado que controle la aparición de bacterias y mantenga el agua con una buena calidad ambiental.
3. El PDEC sólo funcionará una media de 8 horas al día como máximo.
4. El sistema tendrá una bomba que recircule el exceso de agua que no adquiera el flujo de aire para introducirlo en el acumulador de nuevo.

Para realizar el cálculo vamos a utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{A_{capt}}{A_{sup}} = D_f \times h_f \times \frac{V_{wa}}{V_p} \quad (2.20)$$

Donde:

- $\frac{A_{capt}}{A_{sup}}$: Es el coeficiente que se podrá multiplicar por la superficie útil del edificio donde se requiere actuar para que nos refleje cual es la superficie que necesitamos para el captador o acumulador de lluvia.
- D_f : Es el parámetro que dicta los días de funcionamiento del PDEC. Todos los días desde el 1 de Junio hasta el 30 de Septiembre.
- h_f : Son las horas de funcionamiento medio de los días de funcionamiento. En nuestro caso serán 8 horas.
- V_{wa} : Es el volumen de agua introducido total por metro cuadrado de superficie útil por hora. Las unidades estarán en l/m²h.
- V_p : Es el volumen de agua acumulada en las precipitaciones, que como hemos dicho serán las totales anuales.

Introduciendo esta ecuación en el ArcMap mediante nuestra herramienta obtenemos el siguiente mapa. Dicho mapa nos devolverá la correlación antes mencionada.

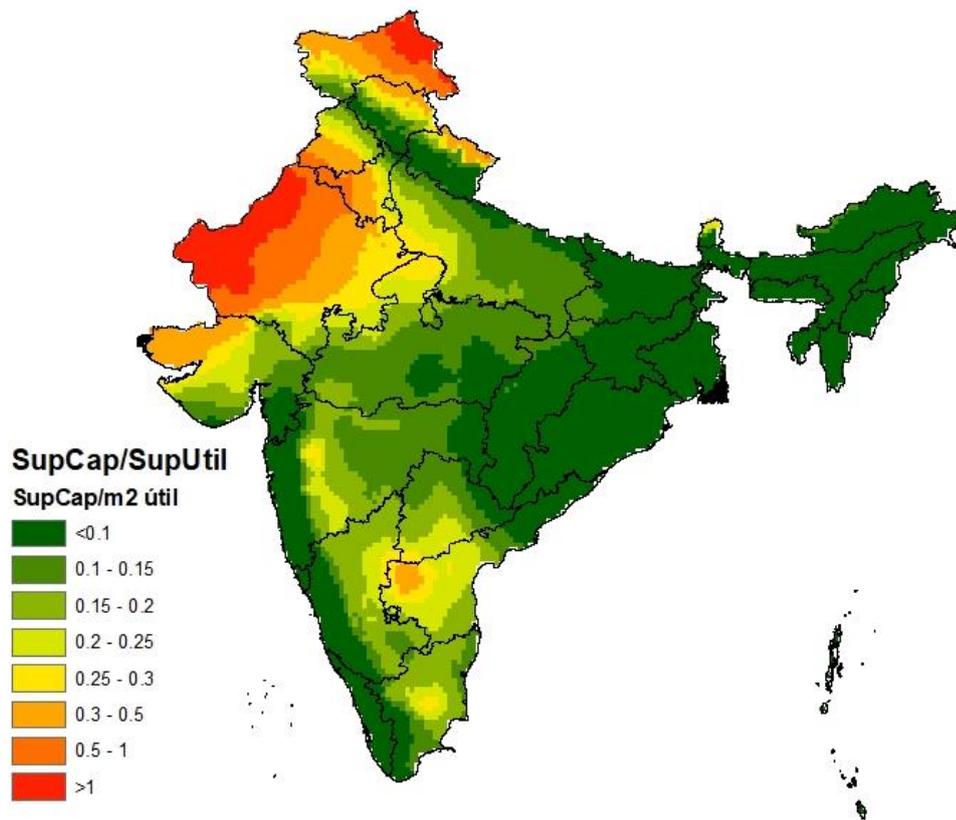


Figura 51 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio.
Fuente Propia.

El mapeado de acumulador nos muestra de manera gráfica la posibilidad de situar el captador y el acumulador en el techo en las zonas que el coeficiente este entre 0 y 1 para edificios cuya altura sea una planta. Si tuviéramos que plantear en nuestro estudio más plantas, deberíamos fijarnos en el mapa en valores pequeños de la correlación. Por ejemplo, para un edificio de 4 plantas nuestro coeficiente máximo para situar el captador en el tejado sería 0.25. Aunque en todos los casos lo único que se necesitaría es que el captador esté relacionado con ese coeficiente.

Como ejemplo de captador se muestra un sistema de sombrilla invertida que almacenaría el agua recogida en un acumulador cilíndrico aparte.

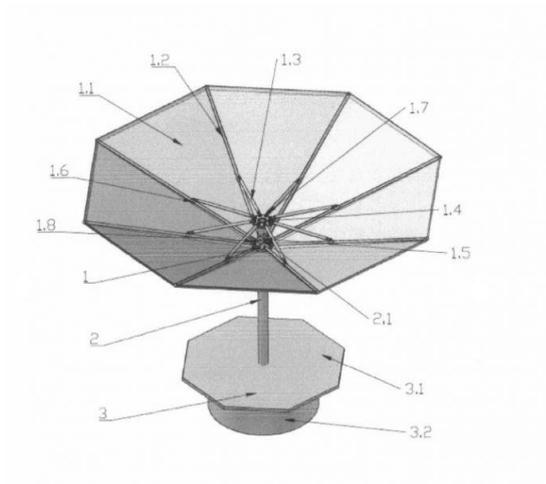


Figura 52 Diseño de un acumulador de agua. Método de Sombrilla invertida. Fuente Bopiweb.

Tras este análisis podríamos también realizar el cálculo del volumen total necesario de agua que hay que añadir al ambiente si el sistema funciona en las condiciones descritas anteriormente (8 horas al día). Como resultado podemos ver en el mapeado que el volumen máximo que se añadirá al flujo de aire que pasa por la torre es 97.06 l/m^2 de superficie útil. Este dato es el agua consumida por el sistema PDEC. Y puede utilizarse a su vez para calcular el volumen que debe tener el depósito para el correcto funcionamiento.

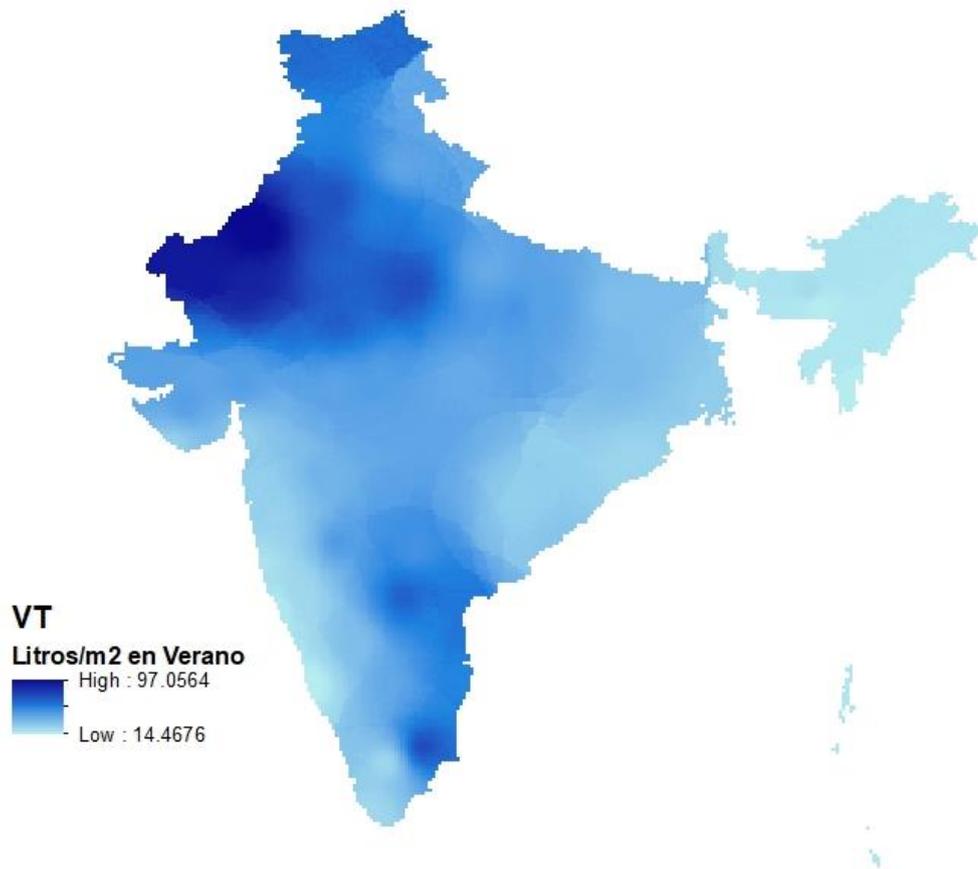


Figura 53 Mapa de Volumen total de agua añadida al flujo de aire por m² útil. Fuente Propia.

Como podemos observar en estudios previos esta agua no es el agua de trabajo total, sino el agua que se consumirá, aportándolo al flujo de aire, en el desarrollo del funcionamiento bajo esos parámetros (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017). Aunque dicho volumen de agua fuese muy superior no afectaría al cálculo del acumulador y captador porque el agua que no se adhiere a la corriente de aire se recirculará de nuevo al depósito. En dicho artículo se recirculan 17 l/h de manera continua, por tanto podemos crear el mapa del Volumen de Acumulador Máximo por superficie útil en la región de India con estos datos.

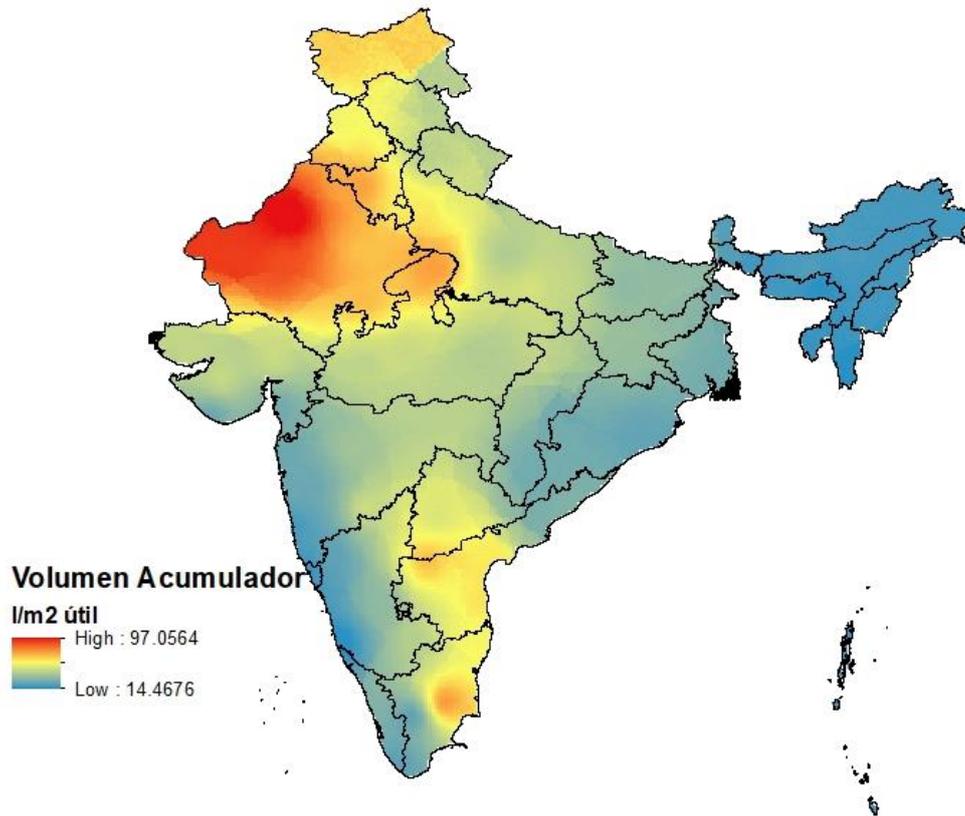


Figura 54 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m² útil. Fuente Propia.

Si nuestro edificio tuviera una altura del habitáculo que pretendemos enfriar distinta y distintas renovaciones horas tendríamos que usar los siguientes factores de corrección:

$$\alpha_h = \frac{h}{\bar{H}} , \quad \alpha_q = \frac{q}{\bar{q}_e} \quad (2.21)$$

Donde:

- α_h : factor de corrección de altura.
- h : altura del habitáculo real, en metros.
- \bar{H} : altura media cuyo valor es de 3 metros.
- α_q : factor de corrección de renovaciones por hora.
- q : caudal de flujo de aire que entra a nuestro edificio, en ren/h.
- \bar{q}_e : caudal medio establecido en 2 ren/h.

Gracias a estos factores de corrección podremos utilizar los datos del mapa corrigiendo si son necesarios los valores obtenidos en (2.19).

$$V'_{wa} = V_{wa} \times \alpha_h \times \alpha_q \quad (2.22)$$

3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON CASOS REALES Y MAPA DE CLIMAS KÖPPEN-GEIGER EN INDIA

A continuación realizaremos una comparativa de aplicabilidad en edificios que ya tienen instalado el sistema PDEC o se han experimentado en ellos este sistema, y también analizaremos si el mapa de Köppen-Geiger se puede usar para determinar el potencial que tiene una zona climática al sistema PDEC. En la región India nos centraremos en tres edificios en los que han sido implantados los sistemas PDEC, con un estudio posterior sobre la respuesta de los usuarios.

3.1. Edificio de la Confederación de Industria India (CII), Bangalore

Este edificio se comenzó a construir en 1997 pero antes de finalizar la obra por los empresa de arquitectura Karan Grover & Asociados se decidió incluir el PDEC como sistema de acondicionamiento de espacios. Tiene un área útil de 2500 m² distribuidos en un auditorio, salas de descanso, librería, oficinas administrativas y comedor. El edificio principal está rodeado por unos jardines y debido a esto el edificio posee muchas cristaleras para aprovechar las vistas.

El edificio pertenece al gobierno de India y está dirigido a la realización de congresos y reuniones relacionados con la investigación. Situado al oeste de la ciudad de Bangalore, la cual estos años ha crecido como sede principal de la innovación e investigación de India, de ahí que se la conoce como la “Silicon Valley de India” (Ford, 2010).



Imagen 1 Foto del edificio CII en Bangalore, India. (Ford, 2010)

En la siguiente foto podemos visualizar alguna de las torres de evaporación del sistema PDEC que se construyó en la ampliación que se realizó en 2003 de este edificio.



Imagen 2 Torres del sistema PDEC del edificio CII en Bangalore, India. (Ford, 2010)

En esta localización se han datado temperaturas superiores a 35°C y algunos días se datan humedades relativas del 30%. Aun así las temperaturas medias de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y la Humedad Relativa media en los meses de verano tienen los siguientes valores mostrados a continuación en nuestros mapeados señalando donde se encuentra el edificio. En el mapeado de Köppen el edificio se encuentra en una zona Bsh (Clima Semiarido).

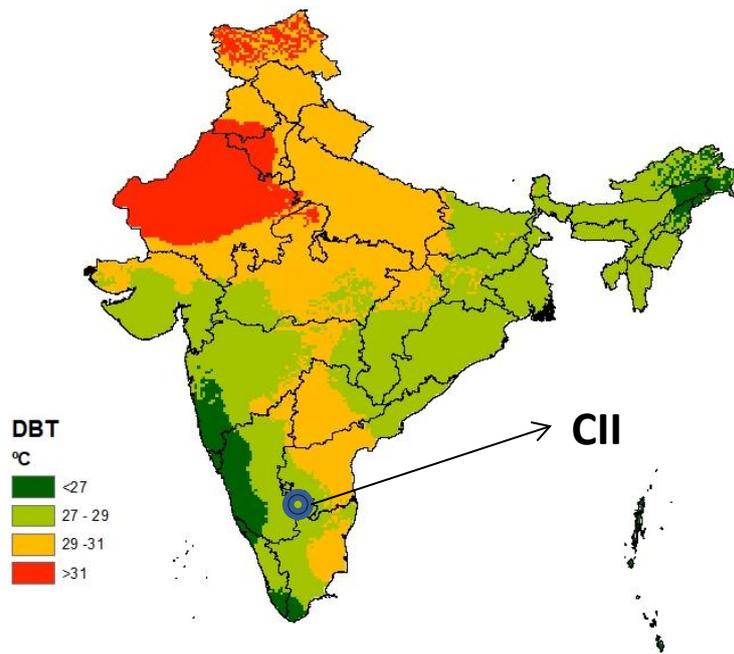


Figura 55 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.

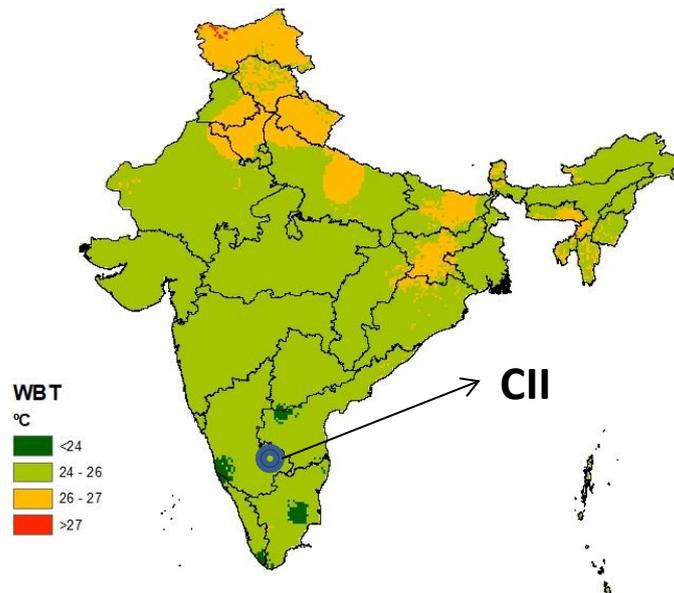


Figura 56 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.

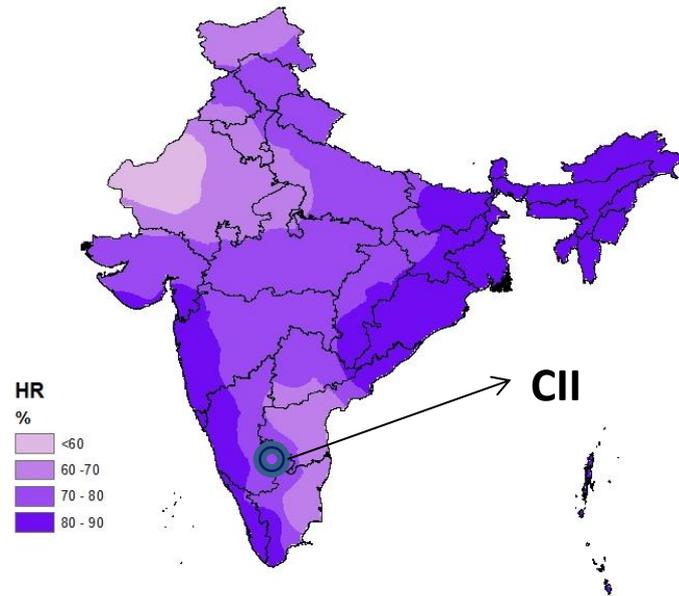


Figura 57 Mapa de Humedad Relativa en India. Localización del edificio CII. Fuente Propia.

Se ha analizado el comportamiento del sistema y el confort en un año. La consecuencia de dicho estudio la analizaremos a continuación (Ford, 2010).

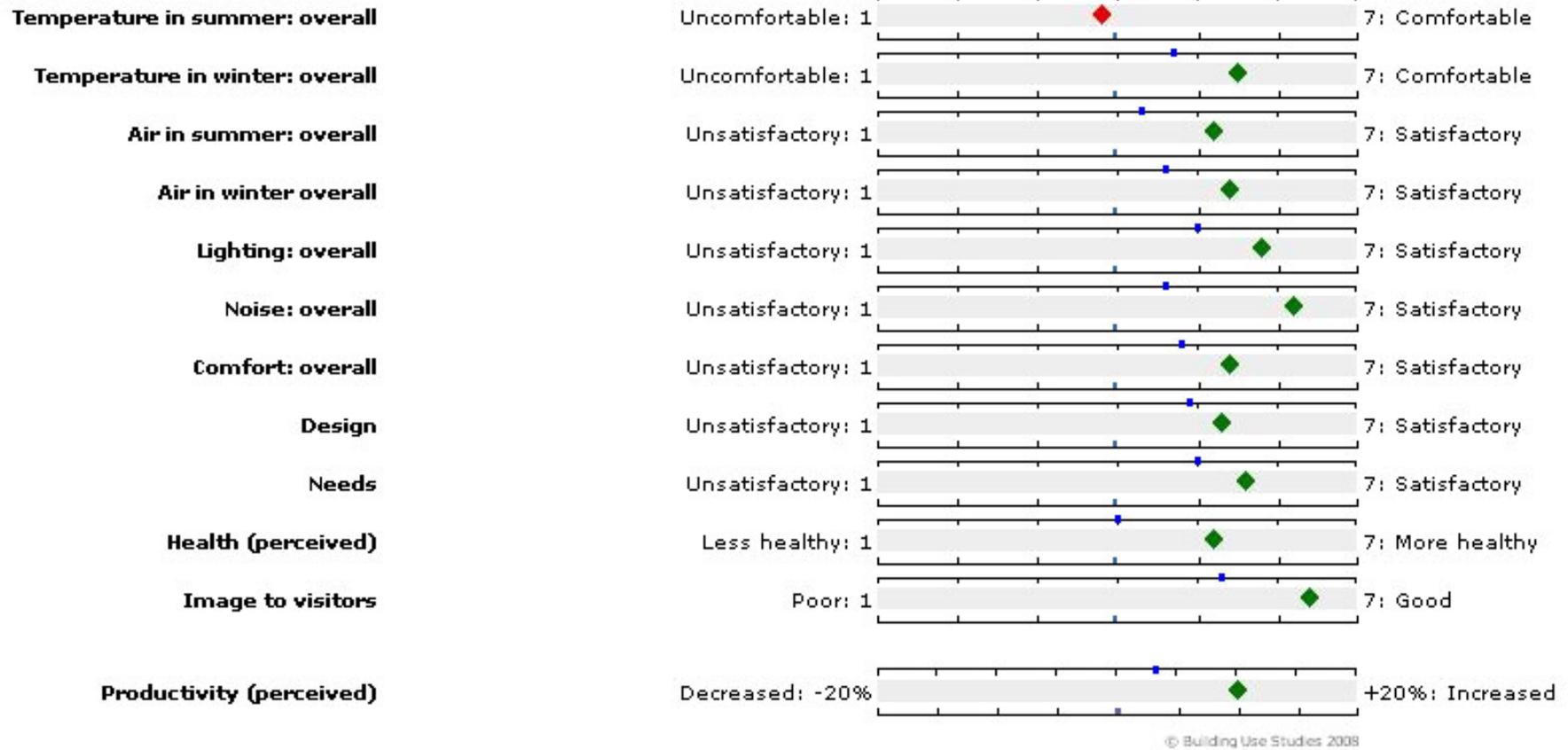


Figura 58 Tabla de Puntuación. Rombo determina el valor medio de puntuación. Marca azul determina la puntuación media global de los casos estudiados. Fuente (Ford, 2010)

Podemos destacar aspectos positivos de este sistema en el edificio como son:

- Productividad: Ha aumentado gracias al confort general que se establece en todo el año.
- Características Arquitectónicas: Establecen que emiten una imagen moderna y bonita a los usuarios y visitantes
- Ruido: Ha descendido el ruido creado por la maquinaria de acondicionamiento del aire, debido a que se suprimen las bombas de calor por evaporadores de agua, o rociadores.

A continuación destacaremos las desventajas:

- Temperatura en Verano: Esta puntuación se encuentra por debajo de la puntuación media que se le puede dar al sistema.
- Aire en Verano: Se refiere a la calidad del aire de los habitáculos generados por el sistema PDEC. Que tendrá relación directa con el confort que sienten con las temperaturas altas de verano.

Vamos a analizar las desventajas situando el caso que nos compete en nuestro mapa de aplicabilidad para observar de forma sencilla que esos datos eran prácticamente obvios comparándolos. Situaremos Bangalore en dicho mapa.

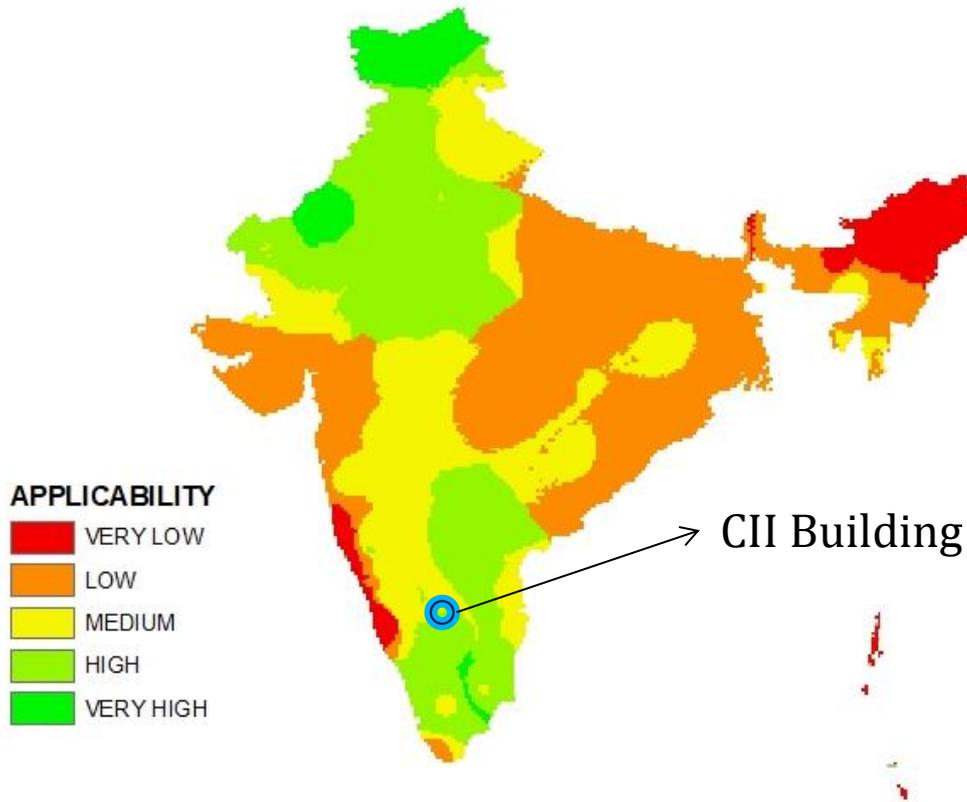


Figura 59 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio CII. Fuente Propia.

Podemos observar que se encuentra en la zona de aplicabilidad Media (MEDIUM) para los meses de verano. Esto se traduce, como se ha comprobado en el estudio de Ford, en un confort más bajo dado que la elección del sistema realizado dentro de ese nivel repercute en una diferencia de temperaturas entre el bulbo seco y el bulbo húmedo más baja y también, aunque con menos significación, una diferencia baja entre una temperatura interior a 26°C y la temperatura de bulbo húmedo.

Aunque la elección de poner este sistema es correcta no deberá extrañarnos la falta de confort de algunos usuarios con la temperatura y la calidad del aire porque el sistema se encuentra con muy altas temperaturas exteriores que no alcanza a disminuir tan eficientemente. Por tanto podemos concluir que es un sistema que si es aplicado en solitario puede llegar a ser una opción no muy acertada en algunos casos. Se ha de optar entonces por agregar un sistema moderno de HVAC de bajo consumo para suplir en algunas ocasiones al PDEC.

Estudiaremos ahora la posibilidad de instalar un captador en la azotea del edificio. Supondremos que el sistema debe suplir el volumen de dos plantas de altura (6 metros) y por tanto el coeficiente de captador deberá estar entre 0-0.5.

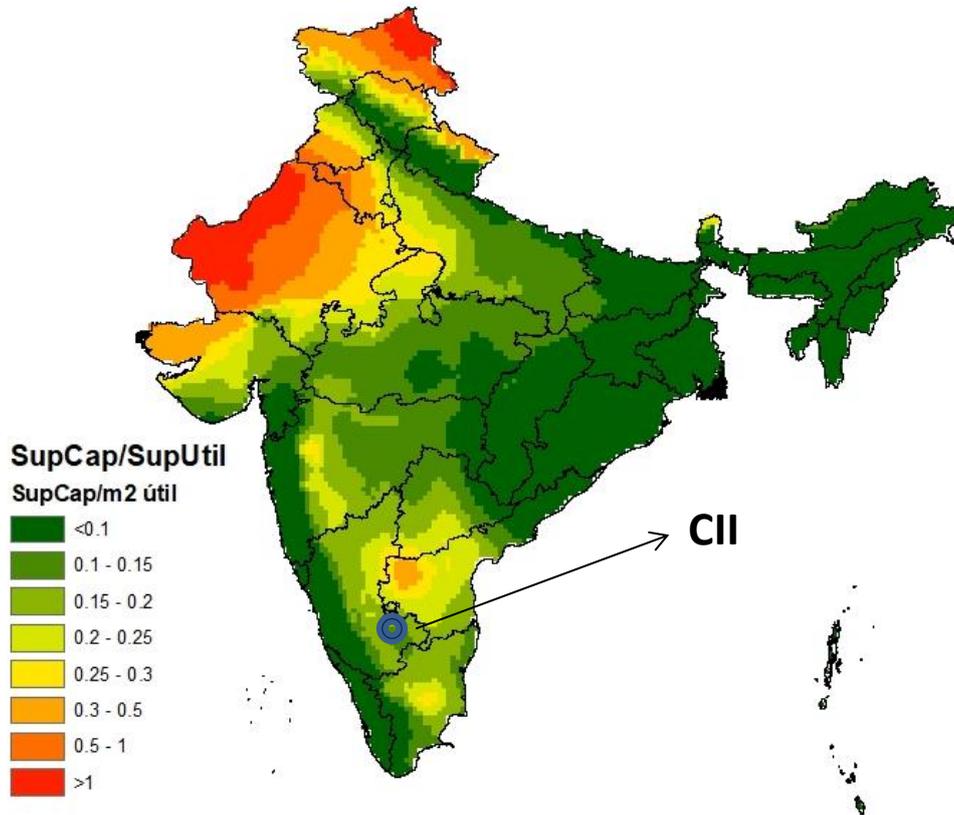


Figura 60 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando CII. Fuente Propia.

Observamos que se encuentra dentro del coeficiente de 0.15-0.2 y por tanto es totalmente plausible el instalar un captador de lluvias en el tejado que supla todo el agua necesaria en los meses de Junio a Septiembre. Además valdría con que el 50% del tejado tuviera instalado el captador.

En cuanto al volumen del depósito acumulador, este vendrá condicionado por el siguiente mapa.

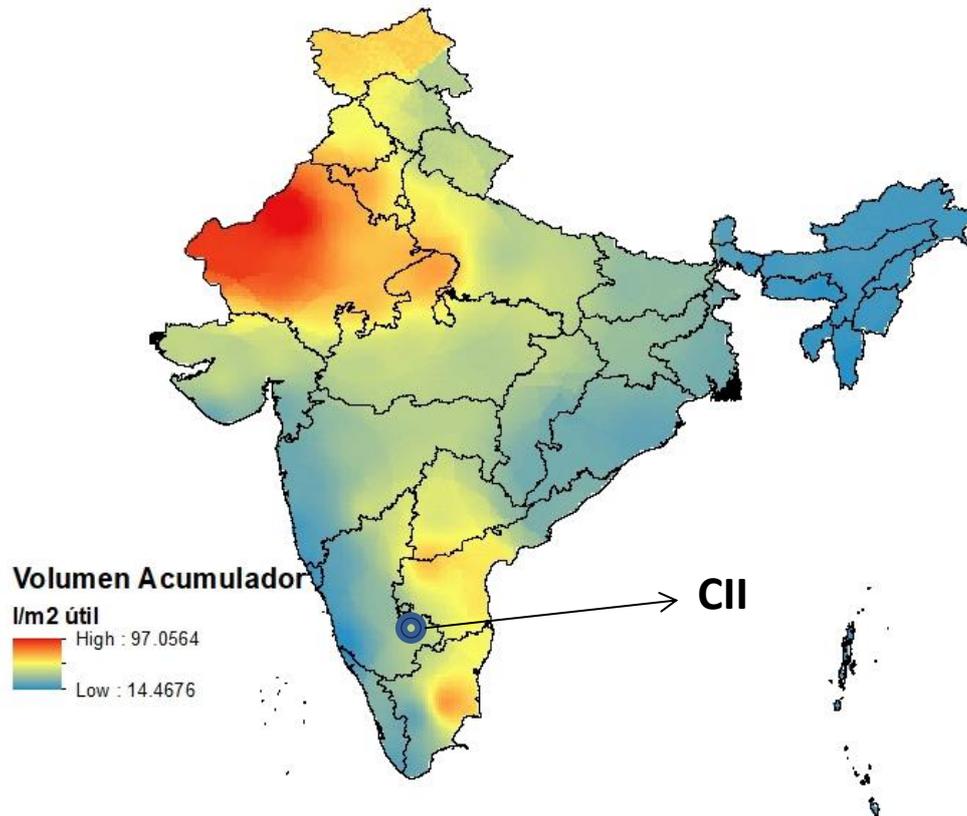


Figura 61 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m² útil. Localización del CII. Fuente Propia.

Gracias al mapa y los datos del edificio obtendremos los siguientes valores. La superficie del acumulador será de 1000 m², el volumen del depósito acumulador será de aproximadamente 200 m³.

3.2. Edificio de Green Business Centre (GBC), Hyderabad

Este edificio también pertenece al Gobierno de India y tiene su uso las administraciones públicas de Medio-Ambiente e Industria en conjunto con la Asociación Americana USAID y el CII. Posee el nombre también de “Centro de Excelencia” o “Green Building Centre”. Situado al noroeste de Hyderabad, cuya población se ha incrementado exponencialmente en los últimos años.

Diseñado por Karan Grover y construido en 2004 el edificio principal tiene una estructura circular rodeado de jardines y fuentes de agua. La superficie útil total es de

1400 m², dividido en oficinas, salas de reuniones, biblioteca y zonas para catering. Años más tarde se han construido anexo a este otros dos edificios, pero en ningún caso sobrepasando las dos plantas, y dos torres de PDEC donde con ayuda del viento transporta el aire previamente evaporado hasta el interior del edificio creando un flujo de aire enfriado (Ford, 2010).



Imagen 3 Foto aérea del edificio Green Business Centre en Hyderabad, India. Fuente Picasa.

En cuanto a los datos ambientales debemos reflejar que estamos en la zona marcada en los mapas de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo media, llegando a picos de temperatura en Junio de hasta 45°C. En Köppen se encuentra en el límite de la zona climática Bsh y Aw (Savanna Tropical).

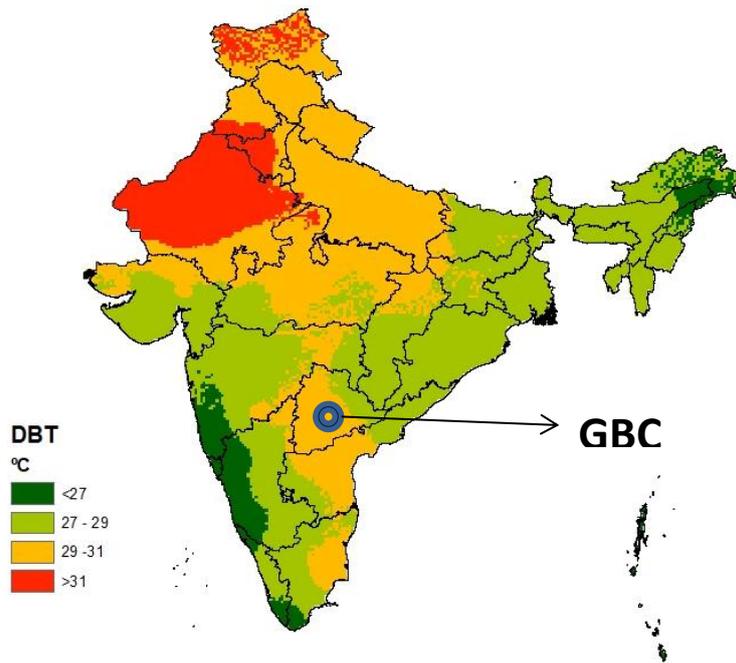


Figura 62 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.

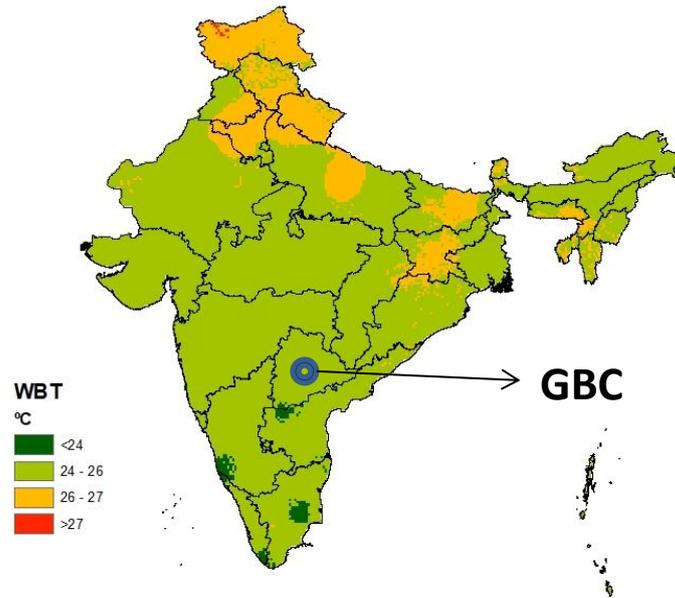


Figura 63 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.

Los niveles de humedad relativa media en los meses de verano se encuentra en un entorno del 71%, a continuación situaremos el edificio en el mapeado de HR.

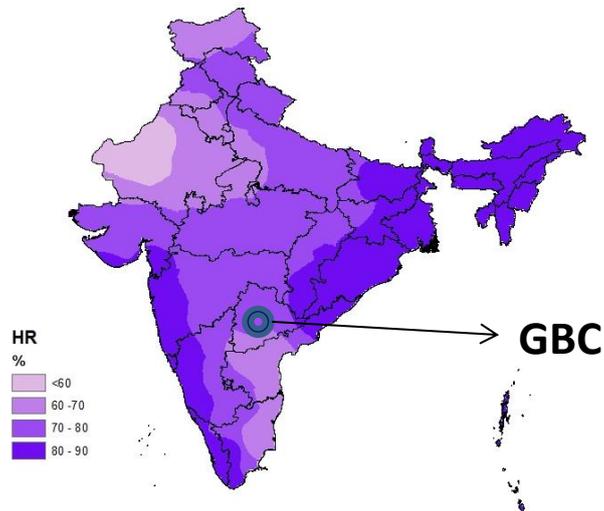


Figura 64 Mapa de Humedad Relativa de India. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.

Como en el caso anterior, tenemos un estudio de confort en los usuarios de duración anual (Ford, 2010). Este estudio lo analizamos a continuación:

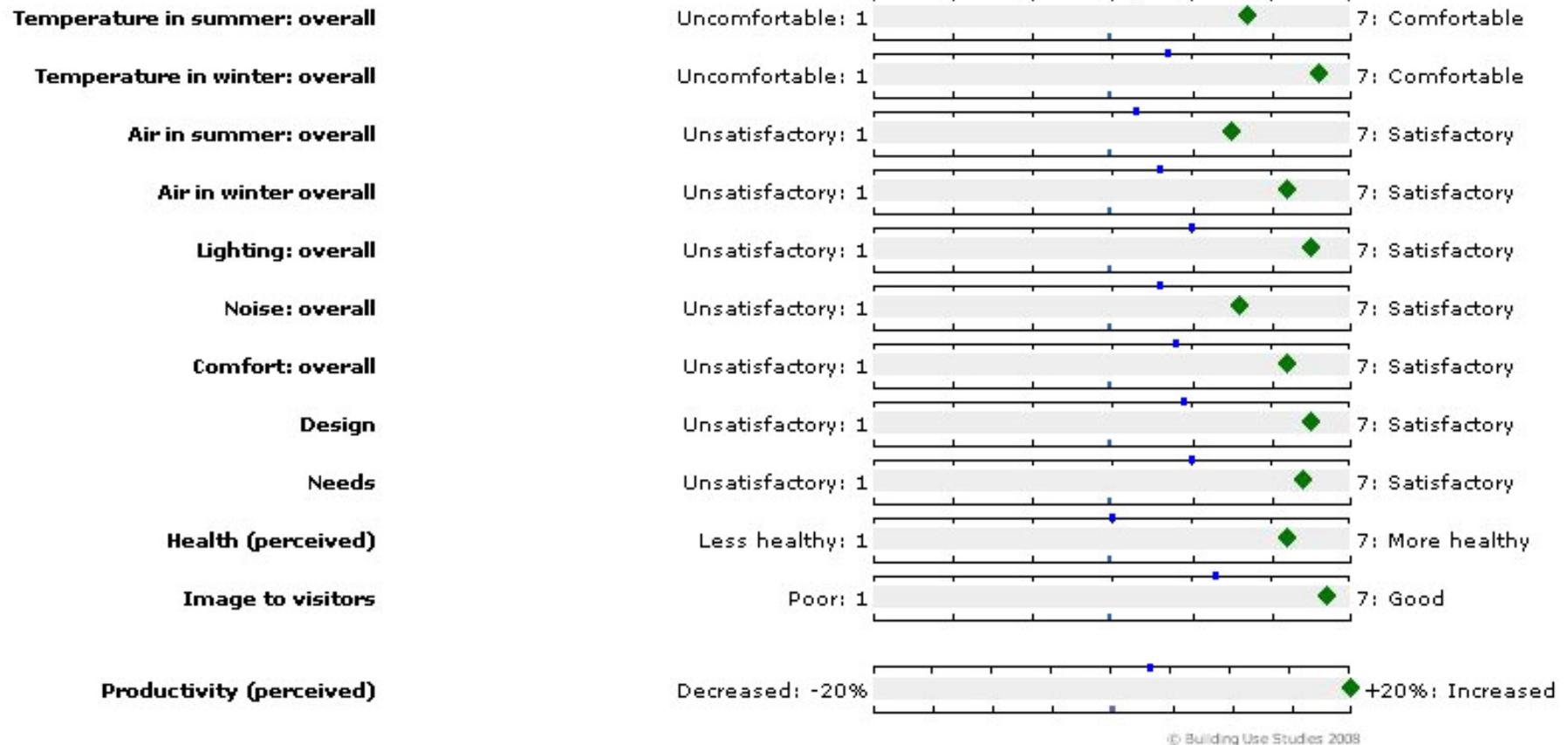


Figura 65 Tabla de Puntuación de 22 usuarios. Rombo determina el valor medio de puntuación. Marca azul determina la puntuación media global de los casos estudiados. (Ford, 2010)

Empezaremos por destacando los aspectos positivos importantes:

- **Productividad:** Aumenta considerablemente, en el rango de un 20% más de productividad debido al gran confort que perciben los usuarios en el año.
- **Ruido:** También es alta la apreciación del silencio debido a la supresión de las bombas de calor. Aun así es más bajo que en el CII de Bangalore, debido a la antigüedad del sistema PDEC.
- **Características Arquitectónicas:** Los visitantes y usuarios están encantados con la percepción exterior e interior del edificio en conjunto con los jardines y sistemas PDEC.

Ahora revisaremos las más desfavorables:

- **Temperatura en Verano:** Está por encima de la media global de todos los casos de estudio pero es más baja que en otra época. Aun así esta apreciación es más alta que en el edificio CII de Bangalore.
- **Aire en Verano:** La calidad del aire de los habitáculos generados por el sistema tiene una apreciación alta, por encima de la media global, pero más baja que en la época de invierno. Esto influirá directamente en el confort que sienten los usuarios con las temperaturas altas de verano.

Vamos a corroborar la tabla de confort en esos meses de verano de manera más sencilla con el mapeado de aplicabilidad del PDEC en India para demostrar el acierto del sistema en ese edificio. Para representar el análisis dentro de la aplicabilidad situaremos a Hyderabad en el Mapa de Aplicabilidad del PDEC en India.

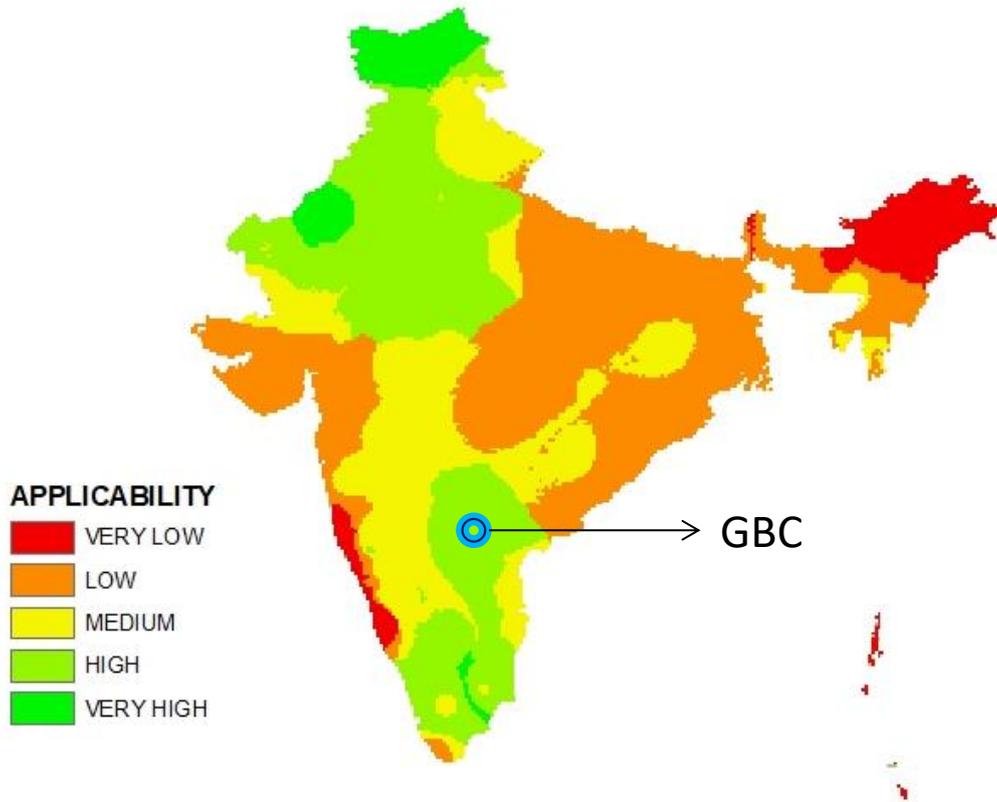


Figura 66 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio GBC. Fuente Propia.

Podemos observar que el edificio se encuentra en la Zona de Aplicabilidad Alta (HIGH) para los meses de verano. Encontrándose en una zona favorable a muy favorable para la instalación e implementación del sistema de enfriamiento pasivo evaporativo de Junio a Septiembre. El estudio realizado por Ford sobre la apreciación del confort en esos meses de verano nos ayuda a corroborar el acierto del mapa de aplicabilidad.

Vamos a representar también que captador necesitaría en esa localidad. En este caso al tener en algunas zonas dos alturas, lo estudiaremos como un edificio de dos plantas. Por tanto como mínimo deberá encontrarse en un rango del coeficiente entre 0-0.5 para poder instalar el captador en el tejado.

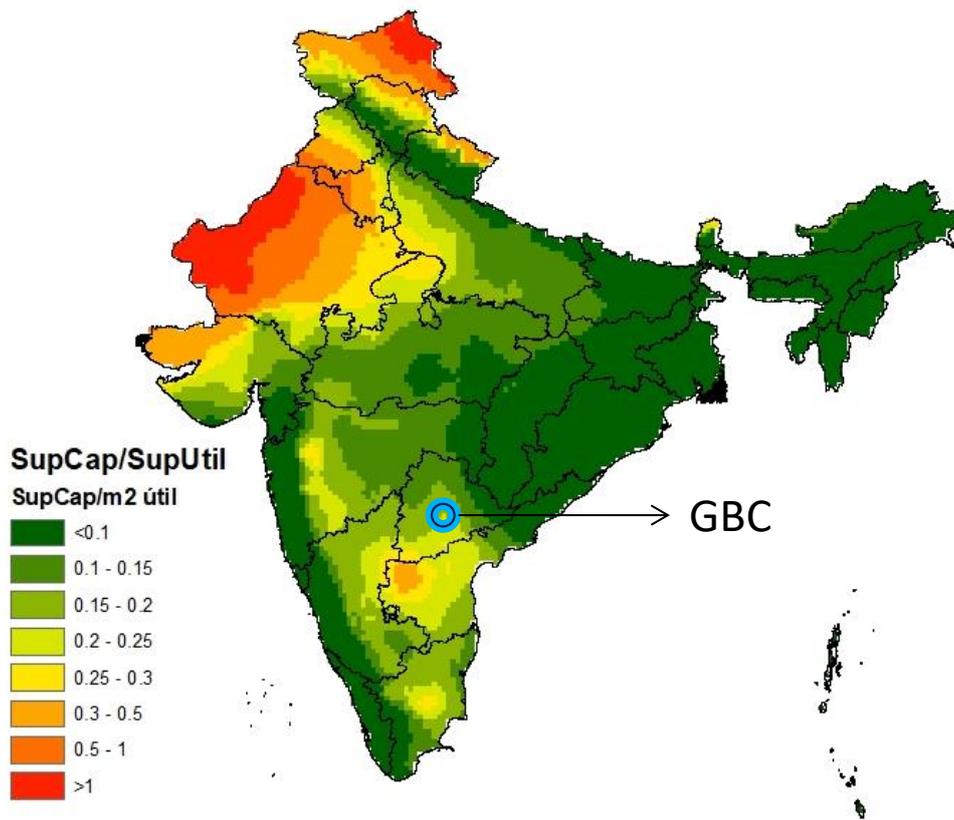


Figura 67 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando GBC. Fuente Propia.

Observamos que se encuentra en un coeficiente de 0.2-0.25 por tanto podría instalar un captador en el tejado que tan sólo ocupara el 50% del mismo.

Para el cálculo del depósito acumulador de agua nos apoyaremos en el mapa como hicimos previamente.

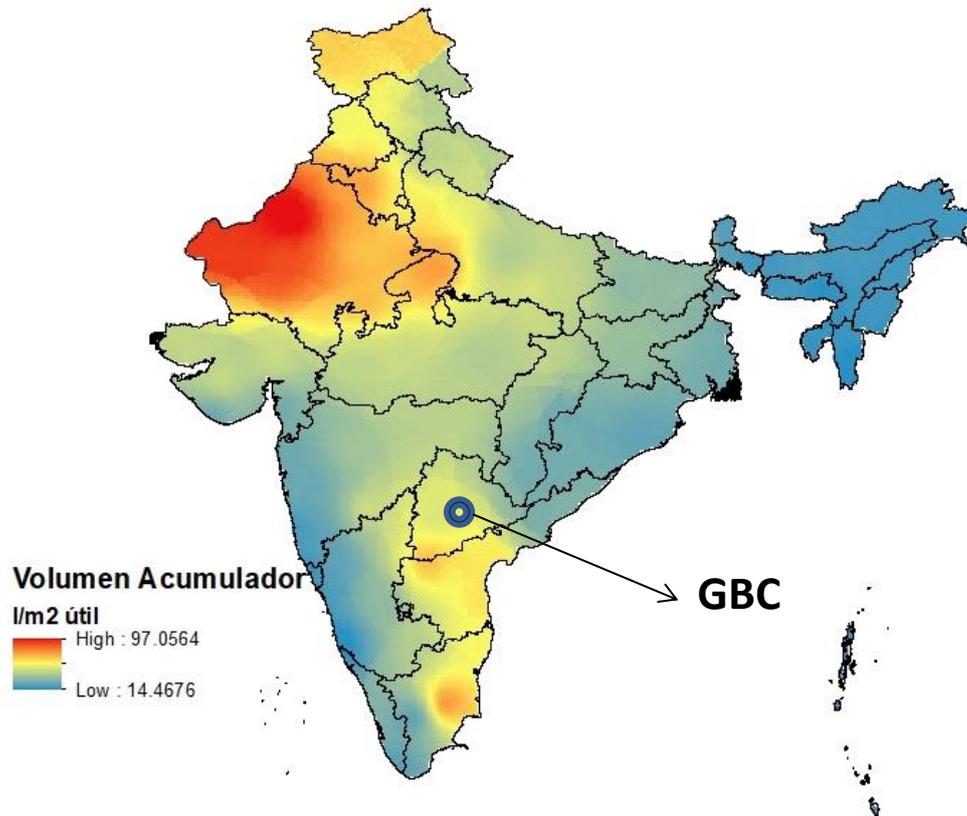


Figura 68 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m² útil. Localización del GBC. Fuente Propia.

Gracias al mapa y los datos del edificio obtendremos los siguientes valores. La superficie del acumulador será de 700 m², el volumen del depósito acumulador será de aproximadamente 147 m³.

3.3. Edificio Torrent Research Building (TRB), Ahmedabad

Este edificio está localizado en gran parque científico cercano al río Sabarmati. Ahmedabad es la ciudad comercial e industrial más grande del Estado de Gurajat, al Noroeste de India, e históricamente siempre se la ha conocido por su producción de textiles. La rápida expansión y modernización de esta ciudad ha creado que muchas empresas establezcan sus sedes a las afueras, evitando atascos y contaminación, además de altos consumos energéticos asociados a esta expansión. Aunque gradualmente están comenzando a percibirse mejoras de eficiencia energéticas, este sigue siendo un problema en la zona. Pertenece a una empresa farmacéutica que le da un uso de

investigación y desarrollo de fármacos. El sistema PDEC instalada cubre una superficie útil total de 20000 m².



Imagen 4 Foto del Edificio Torrent Research Building. Fuente TorrentPharma.Com

Se puede apreciar las numerosas torres de sistema PDEC que posee el edificio. El clima local está caracterizado por meses muy secos que alcanzan temperaturas de 45°C de Marzo a Junio, seguido de una húmeda época de monzones donde se alcanzan los 32°C. La zona climática de Köppen a la que pertenece es Bsh. A continuación situaremos, como hicimos previamente, el edificio en los mapas de temperatura y aplicabilidad.

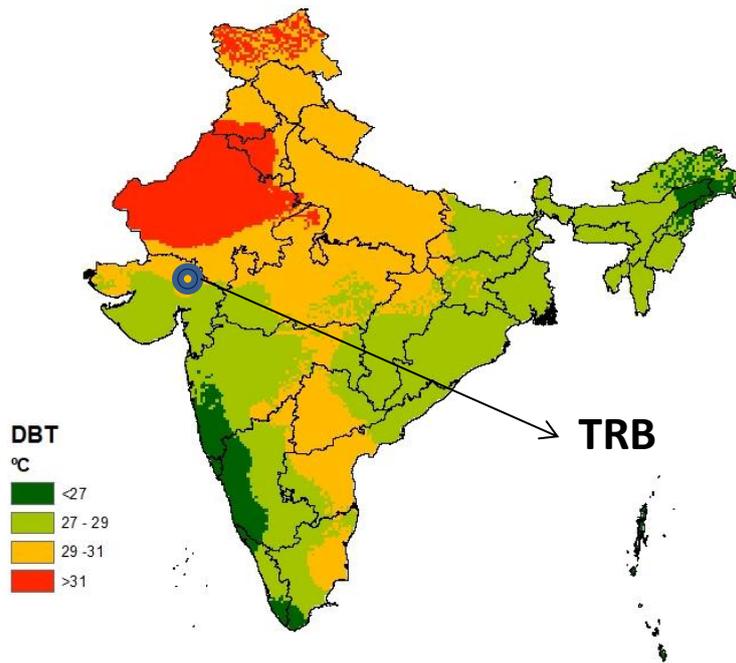


Figura 69 Mapa de Temperatura de Bulbo Seco de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.

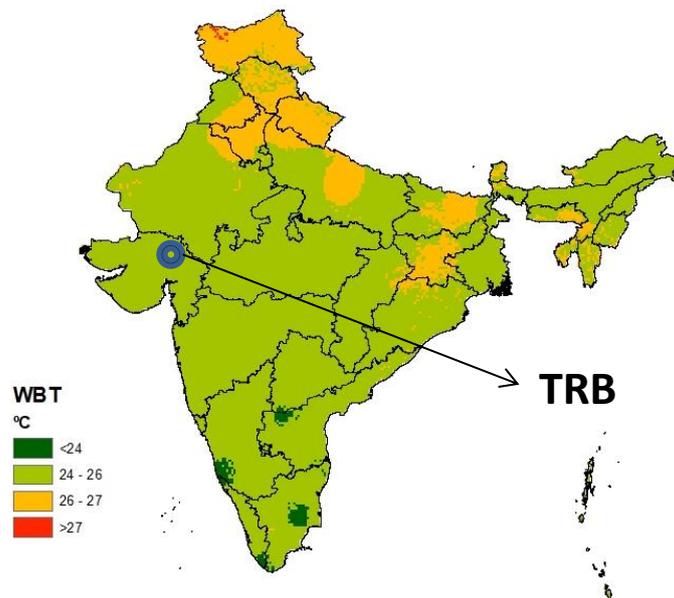


Figura 70 Mapa de Temperatura de Bulbo Húmedo de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.

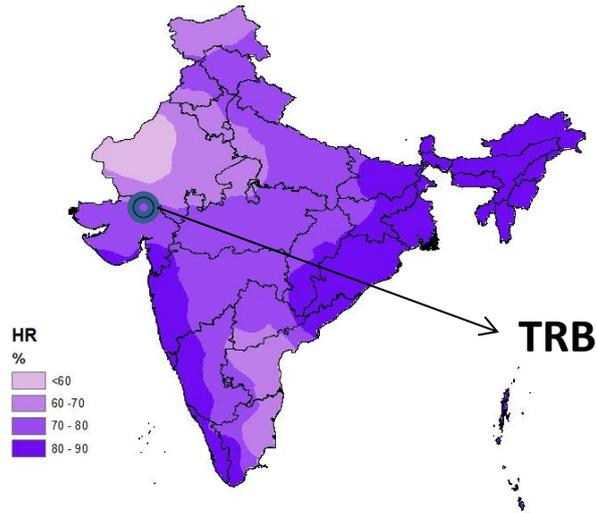


Figura 71 Mapa de Humedad Relativa de India. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.

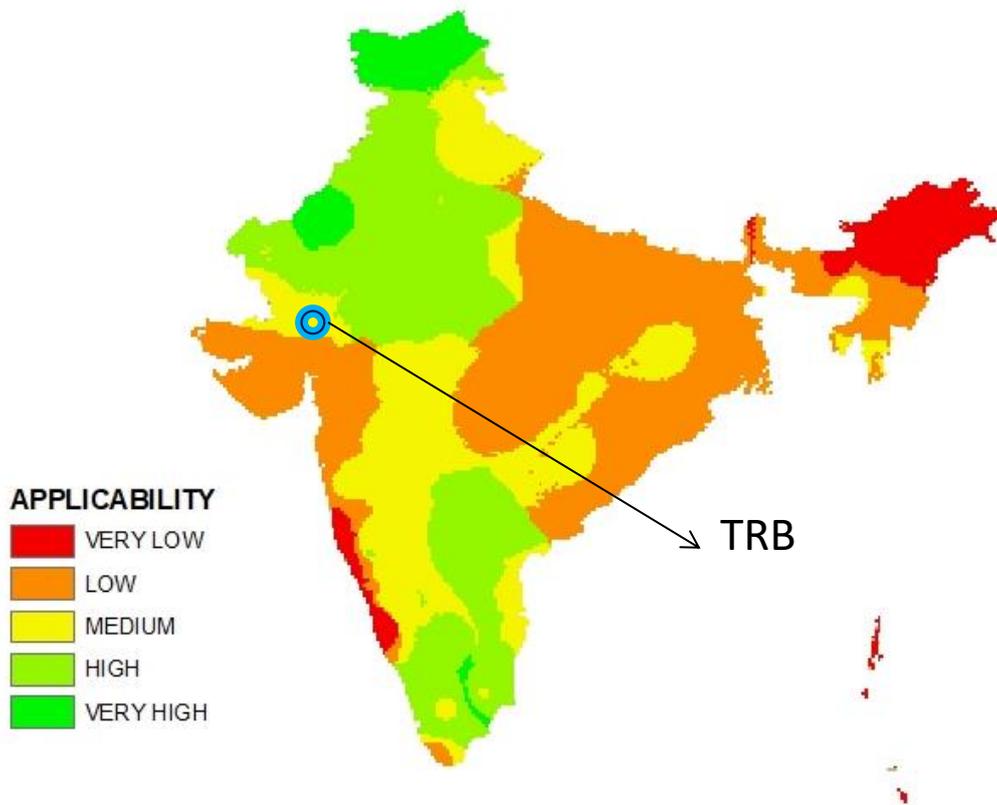


Figura 72 Mapa de Aplicabilidad del PDEC. Localización del edificio TRB. Fuente Propia.

El confort de los usuarios según un estudio que analizaba a través de puntuaciones el confort de 22 usuarios certifica que el PDEC realiza un buen trabajo, aunque a nivel global las puntuaciones se sitúan por debajo del CII de Bangalore y el GBC de Hyderabad (Ford, 2010).

En esta ocasión este mismo estudio del edificio nos da un valor aproximado de los litros que se gastan al día por metro cuadrado. Dicho valor es $0.3 \text{ l/m}^2/\text{día}$. Aunque no tenemos las horas de funcionamiento podremos averiguar si los resultados de los mapas y los datos obtenidos del estudio corroboran la posibilidad de usar los mapas como guía fiable.

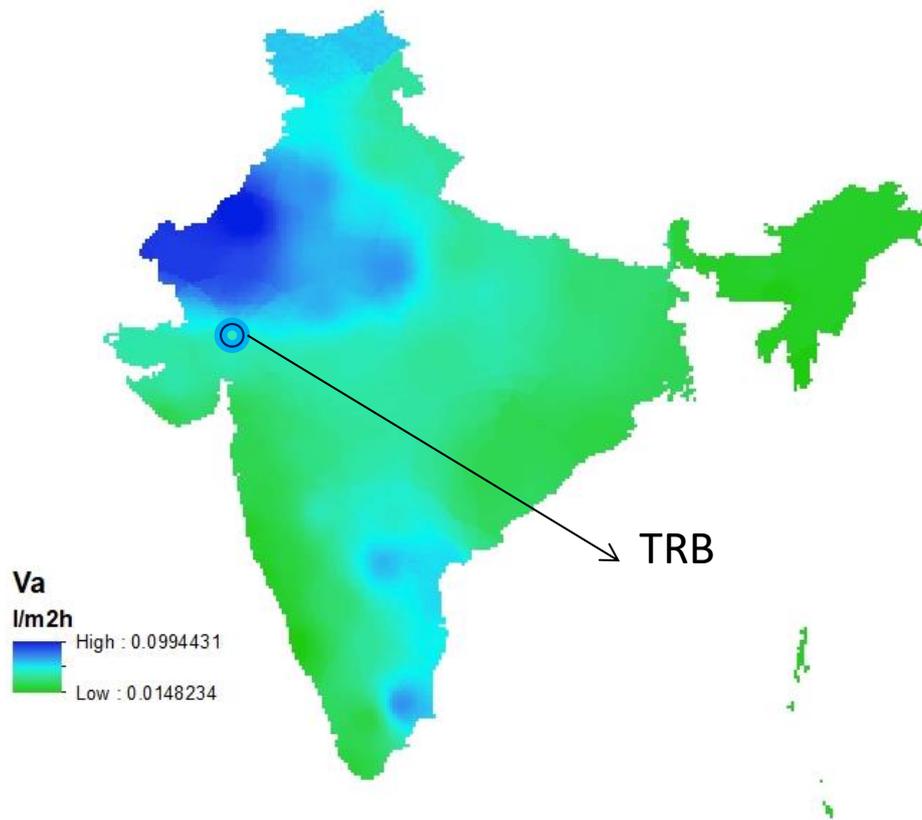


Figura 73 Volumen de agua añadida al flujo de aire de entrada por hora y m^2 útil. Localizando TRB. Fuente Propia.

El valor en esa localidad en nuestro mapa de agua necesaria del sistema PDEC es de $V_{wa} = 0.048073 \text{ l/m}^2\text{h}$. Por tanto verificamos que si el sistema creado por nosotros trabajara un día 6 horas y cuarto resultaría el valor dado por Brian Ford, que es 0.3 l/m^2 .

Representamos también el coeficiente que relaciona el captador con la superficie útil. Este edificio tiene 4 plantas, es decir que su coeficiente deberá estar entre 0-0.25 para poder instalar el captador en el tejado.

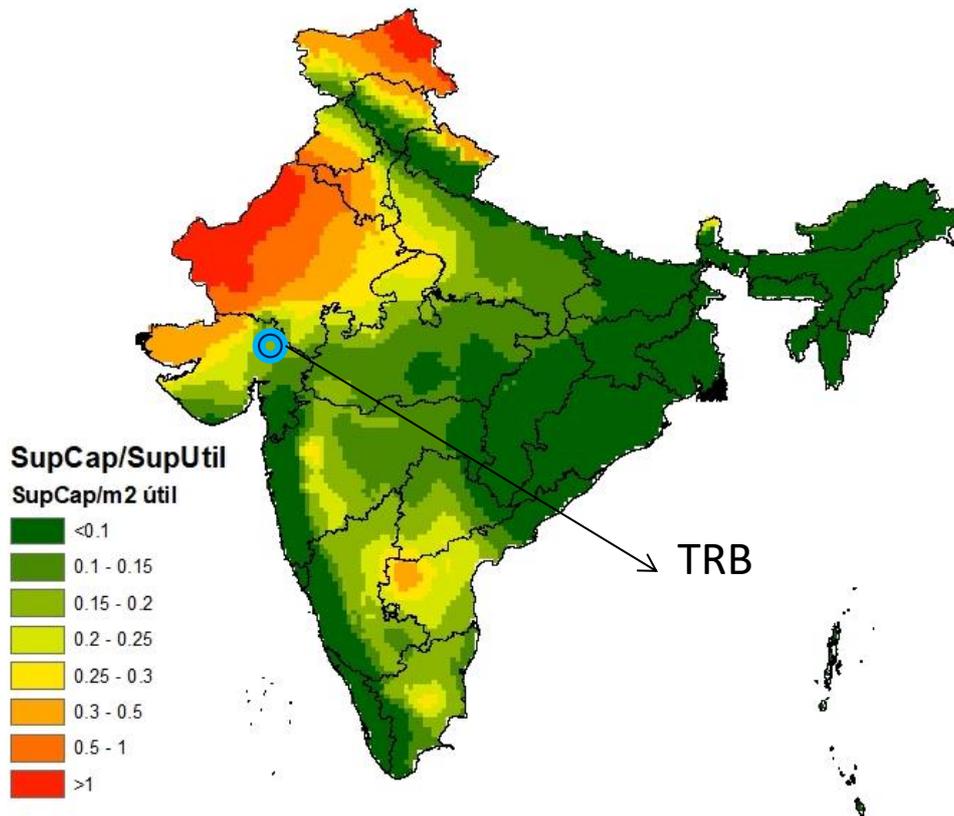


Figura 74 Mapa del Factor de Correlación de Superficie de Captación y Superficie útil del edificio. Localizando TRB. Fuente Propia.

Confirmamos que se encuentra en la zona de coeficiente de 0.15-0.2 por tanto no tendría ningún problema de abastecimiento instalando estos acumuladores en la azotea.

Para el cálculo del depósito acumulador de agua utilizaremos de nuevo nuestro mapa de volúmenes totales del acumulador.

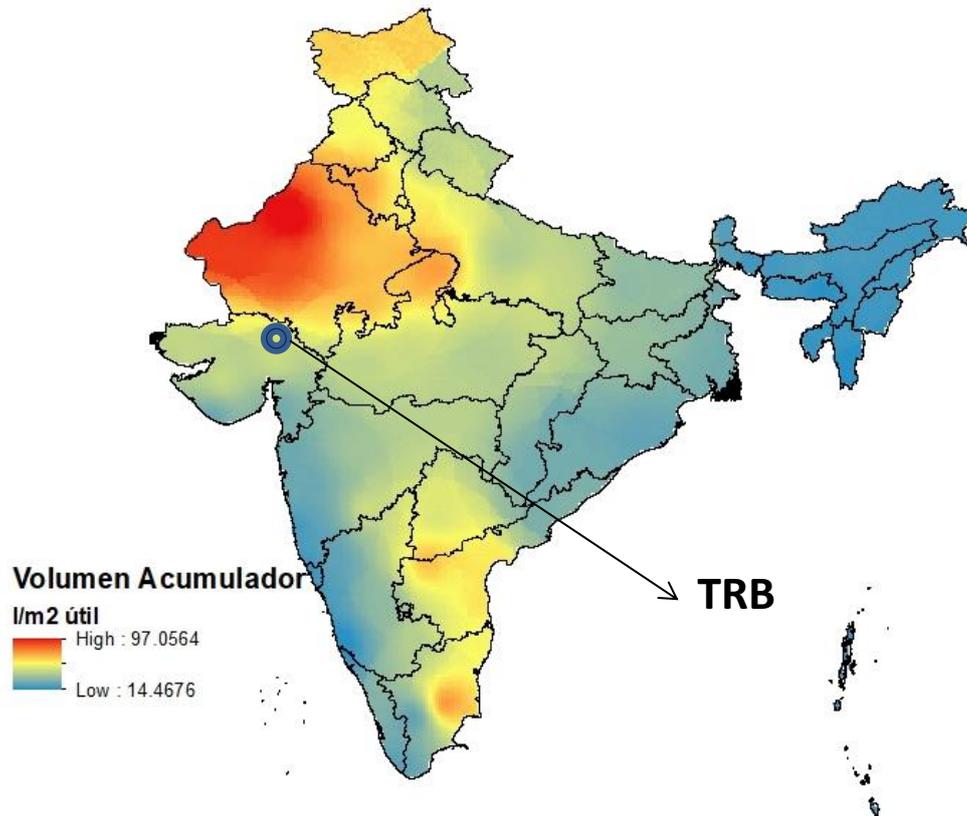


Figura 75 Mapa de Volumen Deposito necesario máximo para el PDEC por m² útil. Localización del TRB. Fuente Propia.

Con ayuda del mapa y los datos del edificio obtendremos los siguientes valores. La superficie del acumulador será de 4000 m², el volumen del depósito acumulador será de aproximadamente 900 m³.

3.4. Comparativa de gasto de Agua con un Caso Experimental de Turín, Italia

A continuación vamos a analizar un caso que se estudió para ver el comportamiento del sistema PDEC y crear una mejora del control del sistema. En este experimento nos centraremos en el agua que consume el flujo de aire que entra por la torre del sistema PDEC.

Vamos a realizar esta comprobación analíticamente y no con los mapas. En esta ocasión tampoco se muestran las horas de funcionamiento al día del sistema pero se puede hacer una aproximación. Aun así para analizarlo tendremos que disponer del

archivo climático de Turín, o lo más cercano posible. En este caso se dispone del archivo meteorológico de Milán en tipo .met. Una vez exportado al Excel y centrándonos en los meses de Verano (Junio a Septiembre) crearemos con nuestras fórmulas (2.18) y (2.18)(2.19) una columna con la cantidad de agua que acepta el flujo de aire. A su vez este dato se multiplicará por unas horas de funcionamiento. Para ser más concreto nos centraremos en el 5 de Agosto debido a que existe una monitorización con esa fecha en el artículo que tiene una duración de 23760 segundos (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017). Uno de los problemas que nos encontramos es que el fichero meteorológico se basa en el Año Típico Meteorológico (TMY) por tanto no se tienen los datos exactos de esa fecha concreta. Tenemos también como información que cada 3 días de funcionamiento el sistema consume 10 litros trabajando en una superficie de 46 m² y dos renovaciones hora. Con las siguientes tablas demostraremos que nuestras ecuaciones (2.17), (2.18), (2.19) y (2.20) pueden extrapolarse a otros casos.

MONITORIZACIÓN		46 m2		
TIEMPO DE TRABAJO (h)	VOLUMEN TOTAL (l)	VOLUMEN (l/m2)	VOLUMEN (l/m2h)	
6.6000	3.3333	0.0725	0.0110	

Tabla 6 Datos obtenidos del Caso de Estudio de Turín, Italia. Fuente Propia.

DATOS ARCHIVO TMY DE MILAN						VaxHORAS DE TRABAJO (l/m2 día)								
MONTH	DAY	HOUR	DBT °C	HR %	Va (l/m2h)	2	4	6	8	10	12	16	20	24
8	5	1	16.5	86	0.0105	0.0211	0.0422	0.0633	0.0844	0.1054	0.1265	0.1687	0.2109	0.2531
8	5	2	16.4	86	0.0105	0.0209	0.0419	0.0628	0.0838	0.1047	0.1257	0.1676	0.2095	0.2514
8	5	3	16.3	87	0.0097	0.0193	0.0386	0.0580	0.0773	0.0966	0.1159	0.1546	0.1932	0.2319
8	5	4	16.2	89	0.0081	0.0162	0.0325	0.0487	0.0650	0.0812	0.0974	0.1299	0.1624	0.1949
8	5	5	16.1	90	0.0073	0.0147	0.0293	0.0440	0.0587	0.0733	0.0880	0.1173	0.1467	0.1760
8	5	6	16.5	93	0.0053	0.0105	0.0211	0.0316	0.0422	0.0527	0.0633	0.0844	0.1054	0.1265
8	5	7	17.6	90	0.0081	0.0162	0.0324	0.0486	0.0648	0.0811	0.0973	0.1297	0.1621	0.1945
8	5	8	18.4	88	0.0103	0.0205	0.0410	0.0616	0.0821	0.1026	0.1231	0.1642	0.2052	0.2463
8	5	9	19.4	84	0.0146	0.0293	0.0585	0.0878	0.1170	0.1463	0.1755	0.2340	0.2925	0.3510
8	5	10	20.1	81	0.0182	0.0364	0.0728	0.1092	0.1456	0.1820	0.2184	0.2912	0.3640	0.4368
8	5	11	21.5	76	0.0252	0.0505	0.1010	0.1515	0.2020	0.2524	0.3029	0.4039	0.5049	0.6059
8	5	12	22.1	73	0.0296	0.0591	0.1182	0.1774	0.2365	0.2956	0.3547	0.4730	0.5912	0.7095
8	5	13	22.1	73	0.0296	0.0591	0.1182	0.1774	0.2365	0.2956	0.3547	0.4730	0.5912	0.7095
8	5	14	22	72	0.0305	0.0609	0.1218	0.1827	0.2436	0.3045	0.3654	0.4872	0.6090	0.7308
8	5	15	22.2	72	0.0309	0.0617	0.1234	0.1852	0.2469	0.3086	0.3703	0.4938	0.6172	0.7407
8	5	16	22.2	72	0.0309	0.0617	0.1234	0.1852	0.2469	0.3086	0.3703	0.4938	0.6172	0.7407
8	5	17	22.6	72	0.0317	0.0634	0.1268	0.1902	0.2536	0.3170	0.3804	0.5072	0.6339	0.7607
8	5	18	22.6	72	0.0317	0.0634	0.1268	0.1902	0.2536	0.3170	0.3804	0.5072	0.6339	0.7607
8	5	19	22.2	74	0.0287	0.0573	0.1146	0.1719	0.2293	0.2866	0.3439	0.4585	0.5731	0.6878
8	5	20	21.4	77	0.0240	0.0481	0.0961	0.1442	0.1922	0.2403	0.2884	0.3845	0.4806	0.5767
8	5	21	20.6	79	0.0208	0.0416	0.0832	0.1248	0.1664	0.2080	0.2496	0.3328	0.4160	0.4992
8	5	22	19.8	82	0.0169	0.0338	0.0676	0.1014	0.1352	0.1690	0.2028	0.2704	0.3380	0.4056
8	5	23	18.9	84	0.0141	0.0283	0.0566	0.0849	0.1132	0.1415	0.1698	0.2263	0.2829	0.3395
8	5	24	18.1	85	0.0126	0.0251	0.0503	0.0754	0.1006	0.1257	0.1509	0.2012	0.2514	0.3017

Tabla 7 Datos de Agua Consumida por el edificio cruzado con el archivo climático (TMY) para el 5 de Agosto. Fuente Propia

Observamos que para que coincida la fecha en nuestro archivo debería comenzar a trabajar con el mismo índice de humedad desde las 8 am sin cambiar las condiciones hasta llegar a las 6.66 horas de funcionamiento.

Si buscamos en estos meses otras posibles fechas tendríamos que para el 20 de Septiembre a las 10 am y para el 4 de Agosto a las 11 pm podríamos poner en funcionamiento durante esas horas el sistema y tendríamos la misma agua consumida.

DATOS ARCHIVO TMY DE MILAN						VaxHORAS DE TRABAJO (l/m2 dia)								
MONTH	DAY	HOUR	DBT °C	HR %	Va (l/m2h)	2	4	6	8	10	12	16	20	24
9	20	10	14.5	85	0.0099	0.0198	0.0395	0.0593	0.0791	0.0988	0.1186	0.1582	0.1977	0.2372
8	4	23	17	87	0.0101	0.0202	0.0405	0.0607	0.0810	0.1012	0.1215	0.1620	0.2025	0.2430

Tabla 8 Datos de otras fechas del TMY con un Volumen de Agua Consumida cercano al caso de estudio. Fuente Propia.

Aun debido al fichero climático con datos TMY y ausencia de datos con los que hemos realizado alguna hipótesis comprobamos que estos resultados están dentro del rango de valores calculados para India. Por tanto concluimos que nuestras ecuaciones y por tanto los mapas de recurso hidrográfico son totalmente útiles como guía de consumos y diseños.

3.5. Comparación con el Mapa de Climas de Köppen-Geiger en India

En India el mapa climático de Köppen-Geiger se presenta con varios tipos de clasificaciones climáticas. Existen zonas donde podemos apreciar mucho cambio en pocos kilómetros de distancia, como es en el Norte. También se aprecia grandes zonas que destacaremos a continuación.

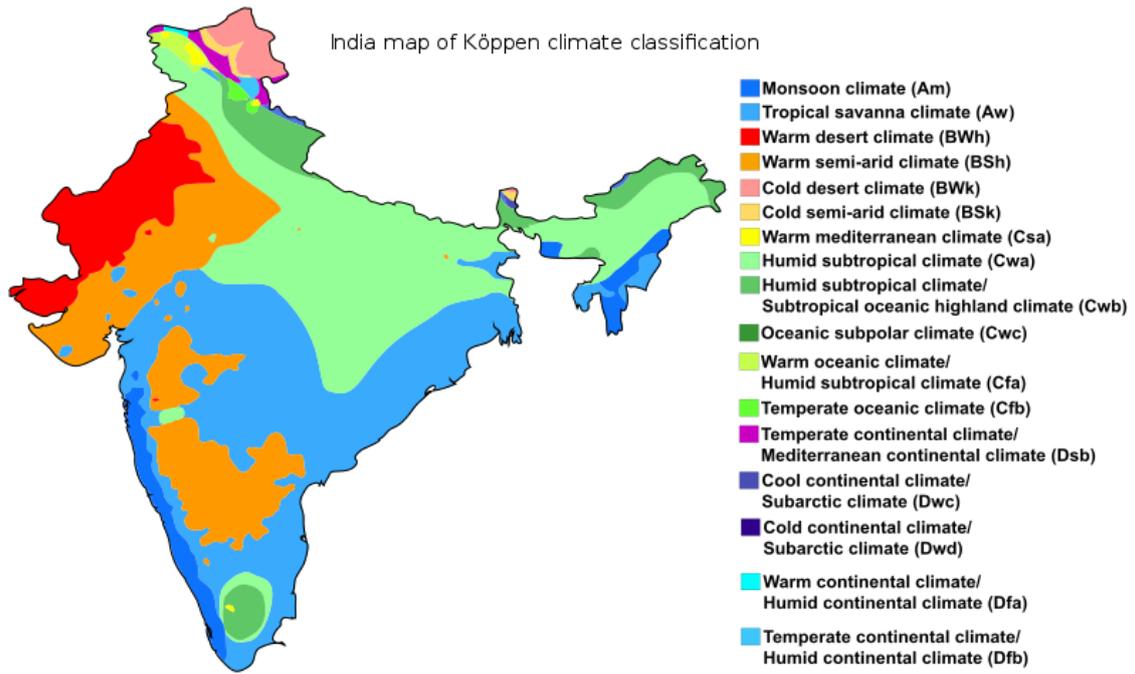


Figura 76 Mapa de clasificación climática de India según Köppen-Geiger. Fuente Wikipedia.Com

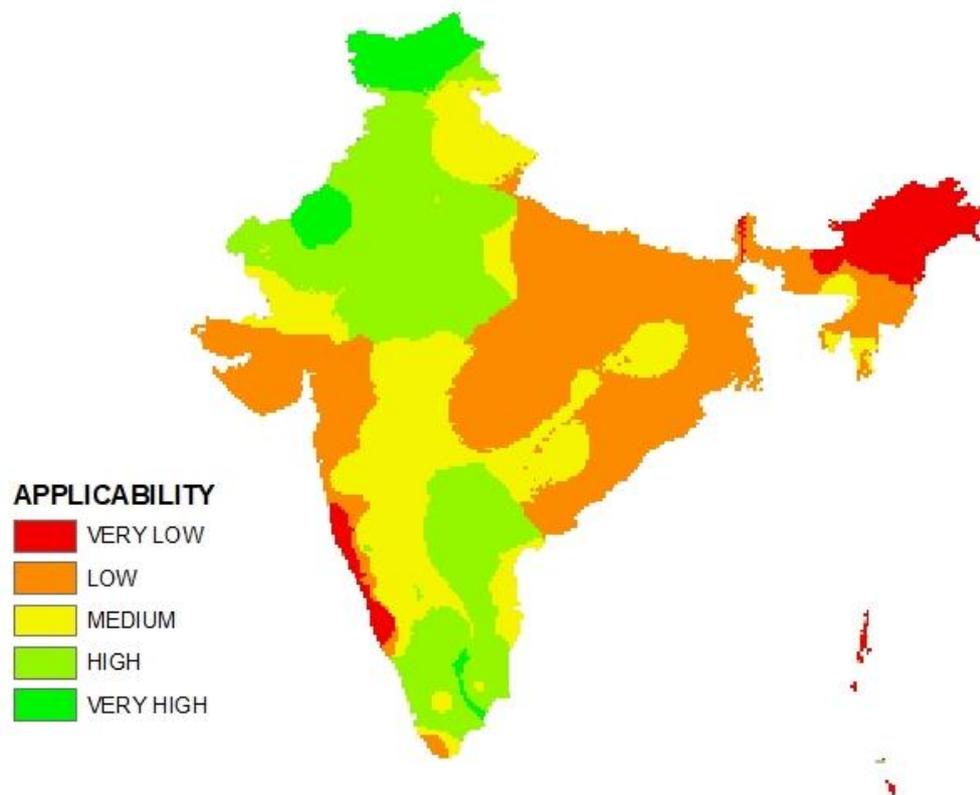


Figura 77 Mapa de Aplicabilidad del PDEC en India. Fuente Propia.

Se puede observar que la zona costera suroeste es la denominada como Clima Monzónico. Al encontrarse bañado por el Mar Árabe padece muchos días de tormentas tropicales (Am). Este clima se caracteriza por tener una estación seca muy marcada y alta concentración de precipitaciones a lo largo del año. En esta zona predomina una baja a muy baja (VERY LOW) aplicabilidad del PDEC. Se excluye la zona más al Sur donde la aplicabilidad es alta en algunas zonas.

Prácticamente toda la mitad Sur de India se encuentra dentro del Clima del Sabana Tropical (Aw) siendo un clima húmedo también. Pero en esta ocasión posee una época seca que es en invierno y es más extensa que la época de lluvias y tienen meses donde la precipitación es muy baja. En nuestro mapa de aplicabilidad tenemos dentro de Aw diferentes grados que irán desde baja a alta (LOW – HIGH). Siendo la aplicabilidad media (MEDIUM) la que más extensión tiene dentro del clima.

Destacan también los Climas Semiáridos y Desérticos que se encuentran en zonas de montañas bajas del interior en el Sur y el Noroeste de India (Bsh y Bsw). Se caracterizan por una precipitación escasa que se dan entre los meses de Abril a Mayo y temperaturas medias por encima de los 18°C. Siendo el clima Desértico el que menos precipitaciones tiene al año. Estos se encuentran en la zona Noroeste, cerca de Pakistán, y zona Central-Sur de India. Estas zonas poseen en su gran mayoría las aplicabilidades más elevadas (HIGH-VERY HIGH). Por tanto sería correcto elegir un clima Bsh y/o Bsw para aplicar el PDEC, aunque deberemos contemplar un estudio más profundo para estos climas en zonas costeras, como se puede apreciar en los mapas, donde da lugar a un decremento de aplicabilidad sustancial.

Al Sur del Nepal podemos observar que predomina el Clima Subtropical que pertenece a los climas húmedos también (Cwa y Cwb). En esta ocasión nos encontramos con un clima templado en invierno y un verano suave. En lo referente a la precipitación, es un clima de valores medios de precipitación anual. La aplicabilidad en estos climas es predominantemente baja (LOW).

Estos datos por si solos pueden originar una interpretación sobre zonas de mayor o menor índice de humedades, zonas áridas, zonas frías, etcétera... Pero no es una guía fiable para la aplicabilidad del PDEC, al menos no en los meses de Junio a Octubre.

Aunque hay muchos puntos de conexión entre la definición de climas de Köppen-Geiger y el mapa de aplicabilidad no se puede definir como inequívoco la elección del sistema PDEC tan sólo por la situación climática definida por Köppen-Geiger a la que pertenece. Es más fiable realizar la decisión de implantar el sistema a través de los nuevos mapas de aplicabilidad creados.

En el estudio que se realizó de EE.UU. sobre la aplicabilidad del PDEC con Köppen-Geiger se observa que se obtiene una relación prácticamente idéntica cuando estudiamos climas áridos (Bsh y Bsw) (Aparicio-Ruiz, Schiano-Phan, & Salmerón-Lissén, 2018). En estos climas tenemos grandes aplicabilidades del sistema. Aunque cuando se estudia en EE.UU. la zona climática tropical (Aw) tenemos que la aplicabilidad es muy baja. Mientras que en India tiene varias zonas de aplicabilidad que irían de baja a alta aplicabilidad, siendo el principal el grado medio.

Por tanto podemos afirmar que no podemos utilizar los mapas de Köppen-Geiger como guía absoluta del sistema PDEC. Mientras que los mapas creados en este estudio si se pueden utilizar inequívocamente para definir la aplicabilidad.

4. CONCLUSIÓN

Se corrobora gracias a los casos reales ya implementados en esas localidades que el mapa define bastante bien la aplicabilidad y el potencial de uso de los sistemas de enfriamiento evaporativo pasivos. Diversos estudios realizados en otras regiones confirman que la creación de una guía en forma de mapa para la implantación de sistemas PDEC en los edificios es una buena herramienta para poder implementar de forma eficiente cualquier decisión de ahorro energético.

Este estudio además añade varios mapas directamente relacionados con el cálculo de los captadores y acumuladores del sistema PDEC, algo novedoso hasta ahora. Determinando a su vez el gasto total máximo de agua que tendrá dicho sistema bajo las condiciones de trabajo indicadas previamente en el capítulo ANALISIS DEL RECURSO HIDROGRÁFICO DEL SISTEMA PDEC.

Cabe remarcar que todas las ecuaciones e hipótesis realizadas en este documento no se podrán utilizar directamente para otras regiones o con otros datos. Aunque si es posible utilizar los pasos seguidos como guía para el estudio de nuevos datos que concluyeran en diversos mapas de aplicabilidad en diferentes regiones.

También se debe aclarar que aunque queda demostrado que el mapa climático de Köppen-Geiger no se puede relacionar con el potencial de uso del PDEC, se tendría que realizar un estudio anual para comparar el mapa de aplicabilidad del PDEC en India anual con el mapa de Köppen-Geiger.

Se concluye que se debe realizar cualquier cálculo de temperaturas con el método de IDW siempre teniendo en cuenta la cota de cada punto. A su vez se ha de optar por obtener el mayor número de datos disponibles para la creación de estos mapeados. En nuestro caso son 52 estaciones meteorológicas, donde la distancia mínima entre estaciones es de 62 km aproximadamente. Es un número alto de estaciones, pero si el número de estaciones meteorológicas que se obtiene es más elevado repercutiría en un mapa de aplicabilidad del PDEC más preciso y fiable.

Bibliografía

- Aparicio-Ruiz, P., Schiano-Phan, R., & Salmerón-Lissén, J. M. (2018). Climatic applicability of downdraught evaporative cooling in the United States of America. *Building and Environment*, 162-176.
- Chatterjee, B., & Singh, S. (2012). *Energy Efficient Products and Indian Consumers*. CUTS.
- Chiesa, G. (2016). Geo-climatic applicability of evaporative and ventilative cooling in China. *International Journal of Ventilation*, 205-219.
- Chiesa, G. (2019). Geo-climatic potential of direct evaporative cooling in the Mediterranean Region: A comparison of key performance indicators. *Building and Environment*, 38-337.
- Chiesa, G., Grosso, M., Bogni, A., & Garavaglia, G. (2017). Passive downdraught evaporative cooling system integration in existing residential building typologies: a case study. *Energy Procedia*, 599-608.
- Chiesa, G., Huberman, N., & Pearlmutter, D. (2019). Geo-climatic potential of direct evaporative cooling in the Mediterranean Region: A comparison of key performance indicators. *Building and Environment*, 318-337.
- Flor, F. J., Domínguez, S. Á., & Félix, J. L. (2008). Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations. *Energy and Buildings*, 1984–1990.
- Ford, B. (2010). *The architecture & engineering of downdraught cooling: a design sourcebook*. Nottingham: PHDC Press.
- Gupta, E. (2014). *The Impact of Development on the Climate Sensitivity of Electricity Demand in India*. <http://www.isid.ac.in/~epu/wp-content/uploads/2014/09/dp14-08.pdf>.

- Indraganti, M. (2011). Thermal comfort in apartments in India: Adaptive use of environmental controls and hindrances. *Renewable Energy*, 1182–1189.
- Jain, M., Chhabra, D., Mankoff, J., & Singh, A. (2014). Energy Usage Attitudes of Urban India. *ICT4S*.
- Rawal, R., & Shukla, Y. (2014). *Residential Buildings in India: Energy Use, Projections & Savings Potential*. Ahmedabad: CEPT University.
- Salmeron, J. M., Sánchez, F. J., Sánchez, J., Álvarez, S., & José Luís Molina, R. S. (2012). Climatic applicability of draught cooling in Europe. *Architectural Science Review*, 1-14.
- Shrinivasan, Y. B., Jain, M., Seetharam, D. P., Choudhary, A., Huang, E. M., Dillahunt, T., & Mankoff, J. (2013). Deep conservation in urban India and its implications for the design of conservation technologies. *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (págs. 1969–1978). Paris: ACM.
- Sudarshan, A. (2014). *Lighting Up Bihar: Improving Electricity Supply and Reducing Distribution Losses*. Chicago: IGC India, J-PAL Urban Services Initiative.
- Tewari, P., Mathur, S., & Mathur, J. (2019). Thermal performance prediction of office buildings using direct evaporative cooling systems in the composite climate of India. *Building and Environment*, 64-78.