



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA.

ESTUDIO CLIMÁTICO PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE  
EXPOSICIÓN A LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA EN  
FACHADAS DE LOS ESTADOS UNIDOS  
MEXICANOS.

CLIMATE STUDY FOR CHARACTERIZING THE RISK OF WATER  
PENETRATION ON FACADES OF THE UNITED MEXICAN  
STATES.

*Autor/es*

Sergio Pérez Acín

*Director/es*

José María Pérez Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Julio 2017

DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. SERGIO PÉREZ ACÍN

con nº de DNI 18172663-H en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
GRADO, (Título del Trabajo)

ESTUDIO CLIMÁTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS  
CONDICIONES DE EXPOSICIÓN A LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA  
EN FACHADAS DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Junio de 2017

Fdo: 

# **RESUMEN: *ESTUDIO CLIMÁTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EXPOSICIÓN A LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA EN FACHADAS DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.***

Uno de los muchos desafíos en la construcción de viviendas hoy en día es el diseño de las fachadas, las cuales están sometidas directamente a condiciones adversas producidas por fenómenos meteorológicos como el viento y la lluvia. La combinación de ambos fenómenos provoca el humedecimiento de las fachadas, generando de este modo numerosos síndromes en los edificios y molestias en sus usuarios.

Para solventar los problemas ocasionados por la humedad, el Código de Edificación de la Vivienda de México, no contempla ni estipula las condiciones de diseño que las fachadas deben cumplir en concordancia con la sollicitación a la humedad estimada sobre las mismas, siendo el cálculo de dicha sollicitación, un factor clave para asegurar el correcto diseño y operatividad de los cerramientos exteriores.

Este estudio pretende obtener una caracterización precisa del grado de impermeabilidad requerido en tres estados mexicanos, mediante la aplicación de métodos internacionalmente aceptados, tratando así de mejorar y complementar los documentos técnicos empleados en el citado Código de Edificación.

Se procederá al análisis y registro de datos diarios de velocidad y dirección de viento así como de la intensidad de precipitación en numerosas estaciones meteorológicas de los estados de Aguascalientes, Durango y Zacatecas. Mediante la aplicación de distintos métodos de cálculo se identificará la exposición de las fachadas a la lluvia batiente, así como a la presión eólica simultánea que acompaña a dicha exposición. Como resultado, se generará un mapa de isolíneas, a través del programa Allplan 2016, que permitirá identificar gráficamente las zonas más expuestas a sufrir estos síndromes de la edificación. Además, se comparan los resultados obtenidos con los de otros países ya analizados.

# ÍNDICE

1. OBJETIVO.....	1
2. ALCANCE.....	2
3. INTRODUCCIÓN.....	3
4. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN. ....	5
4.1. ÍNDICE DE LLUVIA BATIENTE (DRI).....	5
4.2. PRESIÓN EÓLICA SIMULTÁNEA A LA PRECIPITACIÓN (DRWP).....	7
4.3. ÍNDICE DE RIESGO DE PENETRACIÓN (RIWP).....	8
5. PROCEDIMIENTO SEGUIDO. ....	11
6. ANÁLISIS CLIMÁTICO Y GEOGRÁFICO DE MÉXICO. ....	13
6.1. MÉXICO. ....	13
6.2. AGUASCALIENTES.....	14
6.3. DURANGO.....	16
6.4. ZACATECAS.....	17
7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. ....	20
7.1. ANÁLISIS INDIVIDUAL.....	20
7.1.1. PARÁMETROS daDRI y DRWP AGUASCALIENTES.....	20
7.1.2. PARÁMETROS daDRI y DRWP DURANGO.....	22
7.1.3. PARÁMETROS daDRI y DRWP ZACATECAS.....	24
7.1.4. HOJAS RESUMEN.....	25
7.2. ANÁLISIS GLOBAL. ....	27
7.2.1. PARÁMETRO RIWP.....	28
7.2.2. MAPAS DE EXPOSICIÓN daDRI Y DRWP.....	30
7.2.3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE CORRELACIONES.....	33
7.2.3.1. Relación DRWP – Presión eólica.....	33
7.2.3.2. Relación Precipitación – daDRI.....	35
7.2.3.3. Relación daDRI – DRWP.....	36
7.2.3.4. Relación daDRI – aaDRI.....	38
8. CONCLUSIONES.....	40
9. BIBLIOGRAFÍA.....	42

## **1. OBJETIVO.**

Con el presente estudio se pretende realizar una mejora de los documentos técnicos mexicanos relativos a la salubridad de los edificios, centrándonos en analizar la exposición al humedecimiento y a la penetración indeseada del agua atmosférica en los cerramientos exteriores.

Este documento procederá al estudio concreto de los estados de Aguascalientes, Durango y Zacatecas, estados de gran interés debido a su elevada densidad de población y a sus características orográficas.

La consecución de unos resultados fiables, requerirá de la utilización de métodos internacionalmente reconocidos que aseguren una correcta caracterización del riesgo de penetración del agua en las fachadas. Para ello se partirá de datos diarios de intensidad de precipitación, así como de la velocidad y dirección de viento simultánea a dichas precipitaciones. Los datos analizados y recopilados tendrán una antigüedad de 8 años como mínimo para conseguir una caracterización más representativa.

Con el ánimo de favorecer un mejor diseño de las fachadas y una sencilla visualización de esta exposición, se pretenden crear mapas de isolíneas en los cuales se represente el índice de exposición a la lluvia batiente así como la presión eólica producida por el viento sobre las fachadas, en cualquier punto del territorio de los tres estados citados con anterioridad.

Finalmente, al analizar una región reducida de la zona central de México, esta investigación puede ampliarse en el futuro con la incorporación de estudios similares que se centren en estados aledaños, complementando y mejorando los documentos técnicos en cuanto a materia de construcción y salubridad para el conjunto del país. Además, se obtendrán una serie de correlaciones que pueden ser comparadas con otros estudios análogos realizados en otros países, y que en cualquier caso, permiten la estimación de valores de exposición incluso en aquellos emplazamientos con determinadas carencias en relación a los datos climáticos de partida.

Personalmente, desarrollar las capacidades necesarias para la gestión de los datos y el correcto análisis de los resultados obtenidos, me ha permitido adentrarme en el campo de las tareas investigadoras, ámbito en el que me gustaría desarrollarme y crecer profesionalmente.

## **2. ALCANCE.**

El presente proyecto se centra en el estudio de las precipitaciones y del viento para conocer el efecto de ambos sobre los cerramientos exteriores en los estados mexicanos de Aguascalientes, Durango y Zacatecas, estados que se encuentran en la parte central de México.

Los datos son recabados por numerosas estaciones meteorológicas automáticas distribuidas a lo largo y ancho de la geografía de estos tres estados. Dichas estaciones pertenecientes al Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del Gobierno de México, proveen datos climáticos diarios variados y que están disponibles en su página web (<http://clima.inifap.gob.mx>).

Los datos diarios obtenidos por los sensores de estas estaciones son variados, desde velocidad y dirección de viento tanto máximas diarias, como medias, la precipitación acumulada cada día, la radiación solar, las temperaturas máximas y mínimas, etc. Los datos de interés para nuestro proyecto serán únicamente la precipitación acumulada diariamente y la velocidad y dirección de viento medias para cada día.

Para la obtención de unos resultados óptimos se necesita realizar un análisis previo de todas y cada una de las estaciones de los tres estados, para así poder seleccionar aquellas estaciones que tengan un mínimo de 8 años de datos históricos. Esta selección genera una lista de 81 estaciones las cuales servirán de base para nuestro estudio.

Algunas de las estaciones analizadas cuentan con algunos días en los que los sensores de las estaciones no pudieron recabar información debido a problemas técnicos, económicos o debidos a condiciones climáticas extremas, estos días generan un grado de fiabilidad de cada estación medido en porcentaje, cuanto más próximo a cero sea este porcentaje mejor será la exactitud y veracidad de los resultados finales. Este grado de fiabilidad también supone una criba extra a la hora de la selección de las estaciones junto con los 8 años de historial como mínimo.

### **3. INTRODUCCIÓN.**

El humedecimiento y la penetración del agua atmosférica en los cerramientos exteriores, puede llegar a provocar lesiones y deterioros en los edificios. Como consecuencia se produce una reducción de su durabilidad, disminuye su capacidad de aislamiento e incluso pueden afectar a la salud de los usuarios de los edificios [1-6].

En México los ordenamientos jurídicos que regulan la edificación de la vivienda desde el punto de vista técnico, son los Reglamentos de Construcción, elaborados por los gobiernos locales (estados y municipios) en donde participan principalmente los colegios de profesionales, siguiendo así el modelo estadounidense. Algunas localidades o estados no cuentan con un reglamento propio o no abarcan los temas necesarios que regulen la construcción. Para ellos existe un documento técnico llamado Código de Edificación de Vivienda (CEV), todavía en desarrollo, el cual permitirá homologar y establecer estándares que faciliten medir la calidad y seguridad de las construcciones. Dicho documento está basado en la experiencia de otros países en el desarrollo de códigos de edificación nacionales [7].

En nuestro caso, de los tres estados analizados, sólo Aguascalientes y Durango poseen un reglamento estatal el cual recoge una serie de normas, derivadas del CEV, las cuales no profundizan lo suficiente en el ámbito que nos concierne. En ninguno de los documentos citados con anterioridad se especifica ninguna diferenciación para el diseño basada en las lluvias ni el viento; simplemente en función del tipo de clima advierte del uso recomendado de materiales impermeables y resistentes a la humedad [7, 11-12].

Debido a los numerosos problemas que la penetración del agua puede originar en los edificios, es muy importante la determinación de la sollicitación por humedad de las fachadas, para poder garantizar la prestación de la solución constructiva asignada y así optimizar su diseño [8,13].

Para un correcto análisis de este problema, debemos centrarnos primero en las causas que originan el humedecimiento de los cerramientos y la penetración de agua en los materiales. Las gotas de lluvia son direccionadas verticalmente en sentido descendente por el efecto de la gravedad, pero debido a la acción simultánea del viento su trayectoria es desviada horizontalmente (lluvia batiente), lo cual provoca que dichas gotas acaben por humedecer los cerramientos verticales de las edificaciones. Además el empuje del viento sobre las fachadas, genera una presión (presión eólica)

la cual es la encargada de favorecer la entrada del agua en los poros y fisuras característicos de los materiales de construcción [8].

Así pues para una óptima y correcta determinación de la exposición a la humedad en las fachadas de los edificios, deberemos cuantificar la cantidad de agua que incide sobre los cerramientos exteriores (Wind-Driven Rain o WDR) así como la presión eólica simultánea a este aporte de agua (Driving Rain Wind Pressure o DRWP) [9].

El estudio de tres estados mexicanos (Aguascalientes, Durango y Zacatecas) supone un paso adelante para una determinación más exacta del riesgo de exposición a la humedad en los cerramientos del país, dado el elevado número de estaciones seleccionadas (81), el relativamente preciso intervalo de registro considerado (diario), y la aplicación de metodologías reconocidas por la práctica internacional. Se pretende así proporcionar unos resultados que contribuyan a mejorar los diseños de fachadas en el país, garantizando que estos diseños resulten operativos ante las condiciones de servicio existentes [10].

Se aborda de este modo el primer estudio acerca de la caracterización del riesgo a la penetración del agua en fachadas de México, dando pie al desarrollo de nuevos estudios de otros estados mexicanos con el fin de comparar y complementar los Reglamentos de Construcción de México [11,12].

## 4. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN.

Para la caracterización a la exposición de las fachadas o cerramientos exteriores al humedecimiento, desde los años 50 del pasado siglo, diversos investigadores comenzaron a medir la velocidad de viento que acompañaba a las precipitaciones, recopilando simultáneamente datos del aporte de agua que alcanzaba a los cerramientos verticales (lluvia batiente) [8,14-15].

Como resultado de estos trabajos se obtuvo una ecuación basada en datos experimentales la cual nos permite estimar la cantidad de agua recibida en las fachadas de cualquier emplazamiento simplemente conociendo los datos simultáneos de precipitación y viento. El cálculo de la lluvia batiente (WDR) se aproxima así como el producto de la velocidad del viento (U), la precipitación acumulada registrada sobre una superficie horizontal ( $R_h$ ) y un factor empírico de ajuste que depende del tamaño de la gota de la precipitación (K) [8].

$$WDR \left( \frac{l}{m^2} \right) = U \left( \frac{m}{s} \right) * R_h \left( \frac{l}{m^2} \right) * K \left( \frac{s}{m} \right)$$

### 4.1. ÍNDICE DE LLUVIA BATIENTE (DRI).

El coeficiente de ajuste (K) es un factor complejo de determinar y altamente variable con cada evento de lluvia. En consecuencia, para la caracterización de grandes extensiones de territorio, internacionalmente se ha venido utilizado una versión simplificada de la anterior ecuación, omitiendo dicho factor empírico. El resultado es un índice de lluvia batiente denominado en inglés “driving rain index” (DRI), que cuantifica el nivel de exposición vigente en cada emplazamiento. Estudios específicos que analicen las características particulares de los eventos de precipitación en cada punto, podrían no obstante proporcionar valores adecuados del factor empírico K, permitiendo una inmediata obtención del valor WDR a partir del índice DRI. Normalmente este índice es promediado para un periodo anual (aDRI), y dependiendo la precisión final de los resultados de la frecuencia de toma de datos, pueden utilizarse datos anuales promedio (aaDRI), datos mensuales promedio (maDRI) o datos diarios promedio (daDRI), siendo éste último el más preciso y fiable, y el utilizado en este estudio [8].

El cálculo de este índice, como hemos descrito antes será:

$$aaDRI = \frac{\sum_{i=1}^N U * \frac{R_h}{1000}}{N}$$

Siendo:

U (m/s): La velocidad del viento promedio registrado a lo largo de N años.

R<sub>h</sub> (mm/año): La precipitación anual del emplazamiento.

N (años): Número de años analizados.

aaDRI (m<sup>2</sup>/s): Índice de lluvia batiente para un periodo anual.

De igual modo obtenemos la ecuación para el daDRI:

$$daDRI = \frac{\sum_{i=1}^n U * \frac{R_h}{1000}}{N}$$

Siendo:

U (m/s): La velocidad del viento media registrado a lo largo de cada día.

R<sub>h</sub> (mm/año): La precipitación diaria registrada en el emplazamiento.

N (años): Número de años analizados.

daDRI (m<sup>2</sup>/s): Índice de lluvia batiente diario.

Para la obtención de unos resultados más precisos también se tiene en cuenta la dirección del viento, para poder obtener así una estimación de cuáles son las fachadas más solicitadas de cada emplazamiento según su orientación  $\theta$ . La ecuación presenta los mismos términos que en el caso anterior al que se le añade la orientación de la fachada y la dirección media del viento [8,18-19]:

$$daDRI = \frac{\sum_{i=1}^n U * \frac{R_h}{1000}}{N} * \cos (D - \theta)$$

Siendo, en la ecuación anterior:

D (°): Dirección media del viento a lo largo del día.

Θ (°): Dirección u orientación de la fachada analizada.

Debido a la omisión del coeficiente de ajuste esta ecuación no mide el volumen real de agua recibida sobre los cerramientos verticales, debido a su simplicidad han sido utilizados para determinar la exposición a la humedad por un gran número de países [8,16-17].

En el presente estudio abordaremos tanto el cálculo escalar como el cálculo direccional del daDRI para todas la estaciones analizadas. El análisis direccional supone un incremento del esfuerzo de cálculo al incluir una variable más (dirección de viento), generando así un análisis independiente para cada una de las 24 orientaciones de fachada  $\theta$  consideradas (cada 15°). Se obtendrán de este modo resultados que ofrecen una visión más exhaustiva de los valores de exposición en cada punto.

## **4.2. PRESIÓN EÓLICA SIMULTÁNEA A LA PRECIPITACIÓN (DRWP).**

Como consecuencia de la acción del viento sobre las fachadas se produce una presión eólica o también llamada “driving rain wind pressure” (DRWP), que es la principal responsable de hacer que las gotas de lluvia penetren en el interior de los cerramientos sin defectos apreciables. Un elevado DRWP supone un riesgo considerable en la penetración del agua atmosférica en fachadas nuevas o restauradas, mientras que en fachadas deterioradas, la penetración de agua puede darse tan solo con valores apreciables de lluvia batiente [8,20].

Para una mejor aproximación de los resultados, el DRWP se obtiene a partir de datos diarios a través de la siguiente ecuación (ecuación de Bernoulli):

$$DRWP = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2}{m}$$

Cuyos términos se corresponden con:

$\rho_{aire}$  (kg/m<sup>3</sup>): Densidad del aire, por defecto 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

U (m/s): Velocidad del viento.

m (días): Número de días en los que se produce la acción simultánea de viento y lluvia.

DRWP (Pa): Presión eólica.

El coeficiente de presión de viento sobre el cerramiento, se adopta como 1 habitualmente, generalizando la utilización de la ecuación para cualquier configuración de fachada.

Como en el caso del DRI, con el fin de obtener un mapa de exposición de la fachada más solicitada de cada emplazamiento al término anterior le añadiremos la direccionalidad del viento y la orientación de la fachada, quedando la ecuación del modo siguiente:

$$DRWP = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2}{m} * \cos(D - \theta)$$

Siendo:

D (°): Dirección media del viento a lo largo del día.

Θ (°): Dirección u orientación de la fachada analizada.

Cabe destacar que el DRWP sólo es obtenido para aquellos días en los que se producen simultáneamente la precipitación en forma de lluvia con el viento.

El uso de registros diarios permite una buena aproximación al valor de exposición real, con un esfuerzo de cálculo asumible. Como en el caso del daDRI, para el DRWP calcularemos tanto el valor escalar como el valor direccional con un intervalo de 15° para las 24 orientaciones de fachada consideradas.

### **4.3. ÍNDICE DE RIESGO DE PENETRACIÓN (RIWP).**

Finalmente para poder caracterizar unívocamente el riesgo de penetración del agua, también denominado “risk index of water penetration” (RIWP) deberemos combinar los dos parámetros anteriormente descritos.

El riesgo de penetración del agua depende de ambos términos por igual, es decir, existen emplazamientos en los que la precipitación es escasa y por tanto las fachadas

se humedecen poco (daDRI bajo) pero por contra puede ser una región muy expuesta al viento cuyo DRWP sea muy elevado haciendo que la poca agua que humedece la fachada penetre en el interior de la misma y viceversa. Por lo tanto es necesario unificar ambos términos en un mismo indicador para caracterizar este riesgo, en el cual ambos parámetros influyan del mismo modo.

Para la obtención de este índice primero deberemos realizar una serie de cálculos para poder comparar las estaciones entre sí. De esta forma deberemos obtener el  $daDRI_{normalizado}$  y el  $DRWP_{normalizado}$  [8,19-20].

$$daDRI_{normalizado} = \frac{daDRI_i - daDRI_{minimo}}{daDRI_{maximo} - daDRI_{minimo}}$$

$$DRWP_{normalizado} = \frac{DRWP_i - DRWP_{minimo}}{DRWP_{maximo} - DRWP_{minimo}}$$

Siendo:

$daDRI_i$  ( $m^2/s$ ): El daDRI de cada estación.

$daDRI_{minimo}$  ( $m^2/s$ ): El daDRI mínimo de entre todas las estaciones analizadas.

$daDRI_{maximo}$  ( $m^2/s$ ): El daDRI máximo de entre todas las estaciones analizadas.

$DRWP_i$  (Pa): El DRWP de cada estación.

$DRWP_{minimo}$  (Pa): El DRWP mínimo de entre todas las estaciones analizadas.

$DRWP_{maximo}$  (Pa): El DRWP máximo de entre todas las estaciones analizadas.

Los valores empleados para el cálculo de estos dos términos corresponden a los indicadores escalares del emplazamiento y no a los direccionales.

Se obtienen de estas dos ecuaciones dos valores adimensionales, los cuales establecen relaciones entre todas las estaciones analizadas y que como se puede observar tendrán un valor de entre "0" y "1", al tratarse de un cociente entre valores máximos, mínimos y propios de las estaciones. Obteniendo de este modo una comparativa entre las estaciones analizadas, poseyendo un mayor riesgo de lluvia

batiente o de presión eólica aquellas con un valor más cercano a “1” y en caso contrario, siendo las menos expuestas aquellas con un valor más cercano a “0”.

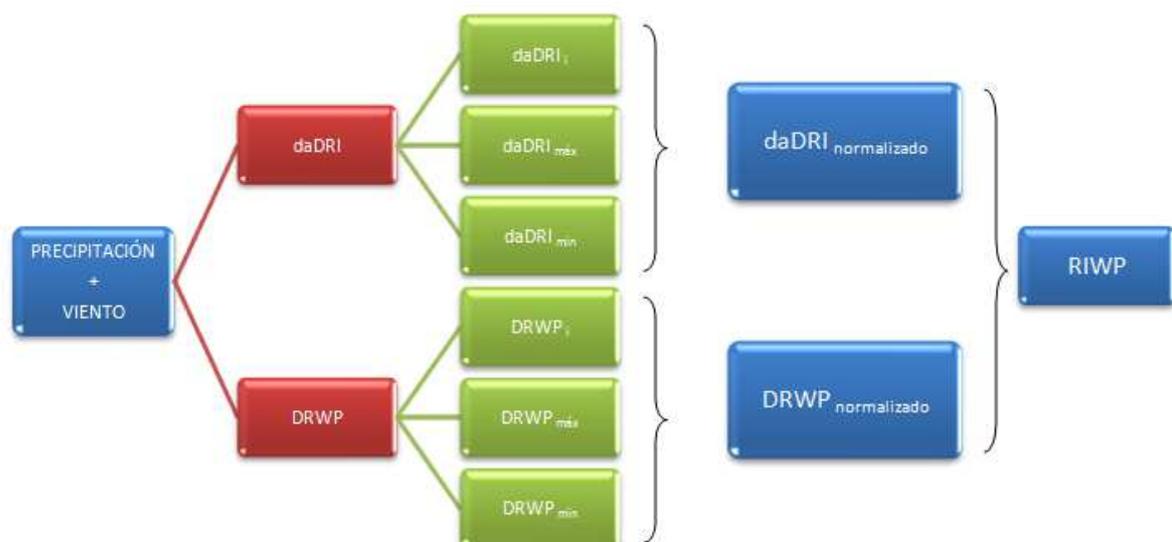
Para concluir ambos dos valores se unen en una misma ecuación en la cual el grado de influencia de los dos términos se considera igual, permitiendo así obtener una caracterización generalista para fachadas con configuraciones heterogéneas. Dicha ecuación es de la cual se obtiene el RIWP y que obedece a la siguiente expresión:

$$RIWP = \sqrt{(daDRI_{normalizado})^2 + (DRWP_{normalizado})^2}$$

Así obtendremos un valor del índice de riesgo a la penetración del agua atmosférica que será un número adimensional y que nos facilitará ver cuáles son aquellas estaciones y por tanto, regiones, de entre las analizadas, con más o menos riesgo de entre nuestros emplazamientos seleccionados y comparar unas con otras. Este valor estará comprendido entre “0” y “ $\sqrt{2}$ ” [20].

A partir de la ecuación anterior podremos interpretar que término posee mayor grado de influencia en el valor resultante, pudiendo variar según la zona geográfica en la que realicemos nuestro estudio.

A continuación se recoge esquema simplificado en el cual se ejemplifica el proceso:



**Figura 1.** Esquema simplificado del proceso llevado a cabo.

## **5. PROCEDIMIENTO SEGUIDO.**

El paso inicial en el desarrollo del proyecto es la programación de la hoja Excel, la cual será la encargada de proveer los resultados obtenidos para cada estación. Para ello se implementan y programan todas las fórmulas definidas anteriormente. En la parte inicial de la hoja Excel se deja espacio para los datos de precipitación así como velocidad y dirección de viento que obtendremos de la red de estaciones meteorológicas mexicanas. En el inicio de estos datos obtendremos diversos valores medios como velocidad de viento media, presión eólica media así como la media de precipitación que posteriormente se recogerán en las hojas resumen de cada estación. Además en la parte inferior obtendremos una fiabilidad de la serie, en función del número de días con datos y el número de días totales que tienen los años analizados obtendremos el porcentaje de omisión de datos. De igual manera se anotarán los valores máximos de cada año para la precipitación y para la velocidad de viento obteniendo conjuntamente sus valores respectivos de velocidad de viento, daDRI y DRWP para el caso de la precipitación máxima y el daDRI, precipitación acumulada y DRWP para el día con la velocidad de viento máxima.

Paralelamente al apartado anterior, generaremos una zona en la cual inicialmente se obtiene la velocidad de viento de los días en los que se produce la precipitación, para posteriormente calcular el valor escalar diario del índice de lluvia batiente como resultado de ambos dos fenómenos (lluvia vertical y viento horizontal). Además obtendremos el DRWP diario aprovechando la velocidad de viento en los días de precipitación. A partir de los valores escalares de daDRI y DRWP calcularemos los valores direccionales diarios para las orientaciones de fachada consideradas de 0° a 360° con un intervalo de 15°, obteniendo de esta manera un gráfico de exposición en función de la orientación de las fachadas. Todos los datos citados anteriormente quedan recogidos en una hoja resumen para cada estación, las cuales se recogen en el Anexo I.

Posteriormente una vez seleccionados los estados que vamos a estudiar, individualmente y costosamente verificaremos año a año, mes a mes cada una de las estaciones para cerciorarnos que los datos recopilados y almacenados por cada estación están correctamente y no hay meses en los que la falta de datos que puedan hacer poco representativos nuestros resultados. Así nos aseguraremos de que el número de años de los cuales obtendremos los datos está comprendido entre 8 y 10, siendo uno de los factores restrictivos a la hora de su selección. Debido a las

restricciones anteriores obtenemos una selección de 81 estaciones, 27 estaciones correspondientes a Aguascalientes, 18 para Durango y 36 para Zacatecas.

Debido a que las estaciones de Durango y Zacatecas se encuentran en la zona centro de sus respectivos estados, se procede además al análisis de 8 estaciones fronterizas que se encuentran en los estados de Jalisco, San Luis de Potosí, Coahuila, Chihuahua, Sinaloa y Nayarit, para poder obtener una representación más adecuada de las zonas alejadas del centro de estos dos estados. Así pues, el número total de estaciones analizadas en este trabajo ha sido de 89 [21].

Los datos verificados son descargados mes a mes para cada año, posteriormente se unen ordenadamente en una misma hoja de cálculo para finalmente volcarlos en nuestra hoja Excel. Una vez cumplimentados los 8-10 años de rigor se procede al análisis de los resultados.

Para concluir se seleccionan los datos de interés, creando un listado de todas las estaciones con sus valores característicos (daDRI, DRWP, altura, coordenadas, años estudiados, etc.) la cual servirá para establecer una comparativa entre las mismas y que se recoge en el Anexo II del presente estudio. Obteniendo de esta manera el  $daDRI_{normalizado}$  y el  $DRWP_{normalizado}$  así como el RIWP, así como los mapas de exposición y distintas correlaciones que se recogen en el Anexo III y en el apartado 7.2.3 respectivamente.

## 6. ANÁLISIS CLIMÁTICO Y GEOGRÁFICO DE MÉXICO.

En el presente punto trataremos de describir cual es el clima del país así como sus principales accidentes geográficos para poder realizar una justificación de los resultados obtenidos.

### 6.1. MÉXICO.

El presente estudio se centra en el análisis de 3 estados centrales de México. La elección de México no es casual, se trata de un país en el cual sus normas técnicas todavía no recogen el grado de impermeabilidad de sus cerramientos exteriores, siendo indispensable para un diseño correcto de sus fachadas, garantizando de este modo la salud y protección de sus usuarios. Debido a su característica altitud más adelante se podría realizar una comparativa con regiones de otros países y regiones anexas observando cómo afecta la altura a los parámetros estudiados. Además México cuenta con una extensa red de estaciones meteorológicas automáticas las cuales son usadas por el Servicio Meteorológico Nacional para la predicción meteorológica, cuyos datos son públicos [21].

Los Estados Unidos Mexicanos, más comúnmente llamado México, es un país de América, situado en la parte meridional de América del Norte. Es un país que limita al norte con Estados Unidos y al sur con Guatemala y Belice. Cuenta con una superficie de 1.964.375 Km<sup>2</sup> siendo el decimocuarto país más extenso del planeta [22].



Figura 2. Mapa de México y países anejos. (Fuente: [28])

El objeto de estudio de este proyecto son los estados de Aguascalientes, Durango y Zacatecas, tres estados ubicados en el centro-norte del país, los cuales conjuntamente abarcan un área de 204.608 Km<sup>2</sup>, con una población total de 4.847.608 habitantes [28-30].

Una de las características fundamentales de estos estados es la gran altitud, con núcleos de población en zonas por encima de 1.800 m, lo que constituye un hecho diferencial con otros países analizados del mismo modo como España, Chile o Brasil.



**Figura 3.** Situación de los estados analizados.

## **6.2. AGUASCALIENTES**

Es uno de los 31 estados que componen los Estados Unidos de México, se encuentra, como podemos ver en la figura anterior en el centro-norte del país, limitando al norte con Zacatecas y al sur con Jalisco [22-23].

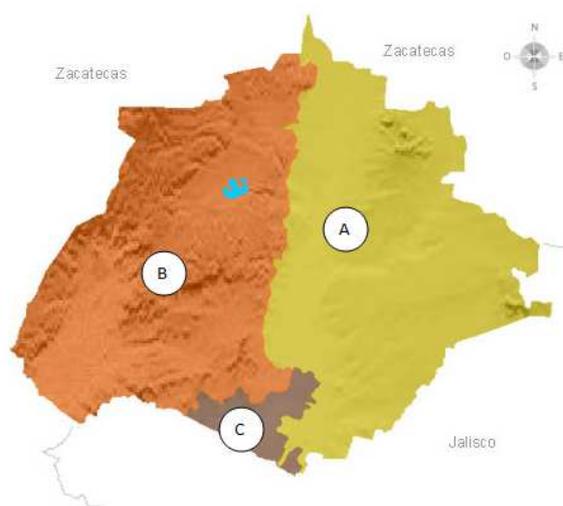
Cuenta con una superficie de 5.618 Km<sup>2</sup> y una población de 1.513.645 habitantes lo que hace que tenga una densidad de población de 269,43 hab/Km<sup>2</sup> [28].

En el estado de Aguascalientes se han estudiado un total de 27 estaciones distribuidas homogéneamente a lo largo de todo su territorio.

<b>Aguascalientes</b>				
<b>Extensión (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº estaciones</b>	<b>Nº habitantes</b>	<b>Km<sup>2</sup> por estación</b>	<b>Nº de habitantes por estación</b>
<b>5.168</b>	27	1.513.645	191,4	56.060,93

**Tabla 1.** Tabla resumen Aguascalientes.

En cuanto a orografía se refiere podemos ver confluir en este estado la Meseta Central marcada con una A en el mapa inferior, la Sierra Madre Occidental la cual corresponde a la zona B y por último el Eje Neovolcánico el cual corresponde a la zona C [22-28].



**Figura 4.** Mapa orográfico Aguascalientes. (Fuente: [28])

Atravesando el centro en dirección norte-sur, se extiende una llanura formando el valle de Aguascalientes la cual posee una altura media de 1.900 msnm. Al noroeste se observa una cadena montañosa llamada Sierra de Tepezalá. Al oeste se eleva Sierra Fría, siendo la mayor elevación de todo el territorio con una altitud de 3.050 msnm. Finalmente al suroeste se encuentra el valle de Calvillo separado del valle de Aguascalientes por la sierra de El Laurel [28].

Climatológicamente hablando podemos decir que predomina el clima semiseco en un 86% de la superficie de la región, el 14% restante presenta un clima templado subhúmedo que se localiza principalmente al suroeste y noroeste del estado, debido principalmente a la sierra de El Laurel y Sierra Fría que provocan un aumento de la humedad y una bajada de la temperatura. Las lluvias son escasas y se presentan principalmente en verano [21-22,26,28].

### 6.3. DURANGO.

Como Zacatecas y Aguascalientes, Durango es otro de los estados que componen los Estados Unidos de México. Está situado al noroeste del país limitando al norte con Chihuahua, al noroeste con Coahuila, al suroeste con Zacatecas, al sur con Nayarit y al oeste con Sinaloa [29].

Su superficie cuenta con 123.451 Km<sup>2</sup> y con 1.754.754 habitantes lo que genera una densidad de población de 14,21 hab/Km<sup>2</sup> [22,25,29].

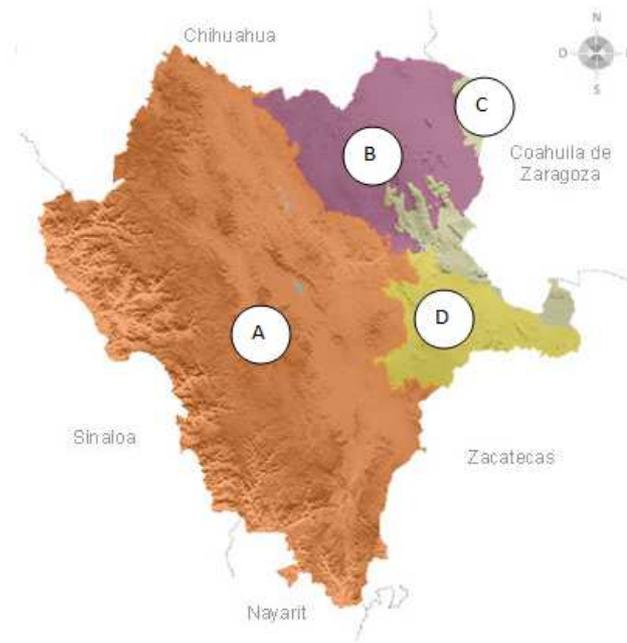
A pesar de la gran su gran extensión y de su comparativamente baja población, las estaciones se ubican preferentemente en los puntos más poblados, por lo que los resultados obtenidos son representativos para una parte significativa de los edificios presentes en el estado.

En este estado se han analizado un total de 18 estaciones distribuidas en la zona centro y sureste de la región puesto que el resto de estaciones no cumplían con las restricciones básicas impuestas por el ejecutor desde el inicio. Para garantizar un correcto análisis del territorio, como ocurrirá con Zacatecas, se realiza el análisis de estaciones fronterizas de los estados anexos a las zonas con escasa información, para poder realizar la triangulación de los puntos obteniendo curvas de nivel para estas zonas.

<b>Durango</b>				
<b>Extensión (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº estaciones</b>	<b>Nº habitantes</b>	<b>Km<sup>2</sup> por estación</b>	<b>Nº de habitantes por estación</b>
<b>123.451</b>	18	1.754.754	6.858,39	97.486,33

**Tabla 2.** Tabla resumen Durango.

El estado de Durango puede dividirse en 4 partes, la zona A correspondiente a la Sierra Madre Occidental, la zona B que corresponde a las Sierras y Llanuras del Norte, la sierra Madre Oriental que comprende el territorio C y por último la zona D correspondiente a la Meseta Central [29].



**Figura 5.** Mapa orográfico Durango. (Fuente: [29])

En lo que se refiere a climatología el 40% del territorio presenta clima seco y semiseco, el 34% se encuentra clima templado subhúmedo, el 14% de la región presenta un clima muy seco, el 11% cálido subhúmedo y el restante 1% templado húmedo. Las lluvias se presentan principalmente en los meses de verano [24-26,29].

#### **6.4. ZACATECAS.**

Es el último de los tres estados analizados, se encuentra en medio de Aguascalientes y Durango, se ubica por lo tanto en el centro-norte del país limitando al norte con Coahuila, al noreste con Nuevo León, al este con San Luis Potosí, al sur con Guanajuato, Jalisco y Aguascalientes, al suroeste con Nayarit y al oeste con Durango.

Cuenta con una superficie de 75.539 Km<sup>2</sup> y con una población de 1.579.209 habitantes generando una densidad de población de 20,9 hab/Km<sup>2</sup> [22,30].

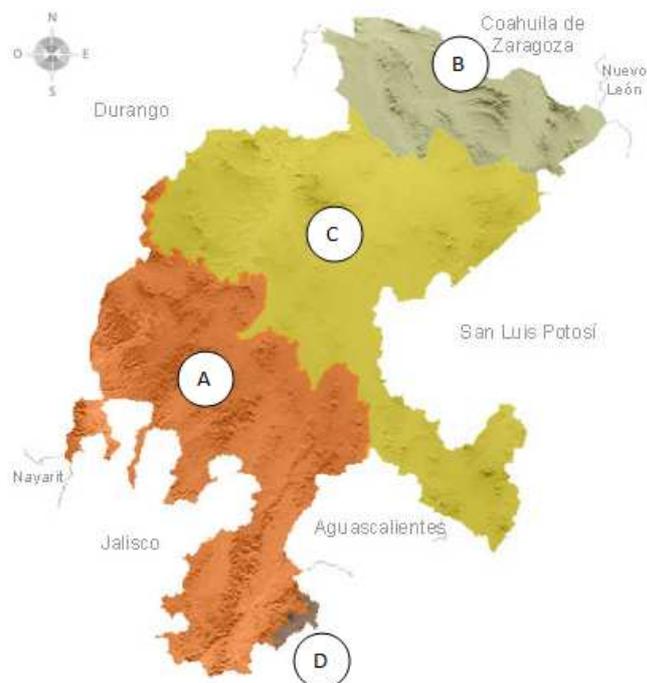
Como ocurre con el caso de Durango, a pesar de la gran extensión de su territorio y de su comparativamente baja población, las estaciones se ubican preferentemente en los puntos más poblados, por lo que los resultados obtenidos son representativos para una parte significativa de los edificios presentes en el estado.

En Zacatecas se han analizado un total de 36 estaciones emplazadas a lo largo de toda su geografía, como en el caso de Durango se ha realizado además el análisis de estaciones de estados anexos debido a la inexistencia de estaciones con datos suficientes en algunas zonas limítrofes.

<b>Zacatecas</b>				
<b>Extensión (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº estaciones</b>	<b>Nº habitantes</b>	<b>Km<sup>2</sup> por estación</b>	<b>Nº de habitantes por estación</b>
<b>75.539</b>	36	1.579.209	2.098,31	43.866,92

**Tabla 3.** Tabla resumen Zacatecas.

El territorio de zacatecas puede dividirse según sus accidentes geológicos como en los dos estados anteriores. La Sierra Madre Occidental abarca el territorio asignado con la letra A, la Sierra Madre Oriental (B), la Meseta Central (C) y el Eje Neovolcánico (D) [21,27].



**Figura 6.** Mapa orográfico Zacatecas. (Fuente: [30])

El estado se encuentra en el norte de México específicamente en la Meseta Central de México. Al oeste y suroeste existen sierras, algunas son mesetas con una altitud

máxima de 2.900 msnm. En la parte central y al noreste se distribuyen una serie de elevaciones separadas por zonas de bajadas y mesetas llanas [27,30].

Climatológicamente hablando podemos hablar de que el 73% de la entidad presenta un clima seco y semiseco, el 17%, presenta clima templado subhúmedo y se localiza hacia el oeste del estado; el 6 % es muy seco y se presenta hacia la parte norte y noreste de la región, el 4% restante presenta clima cálido subhúmedo y se encuentra hacia el sur y suroeste de la entidad [21,24,26].

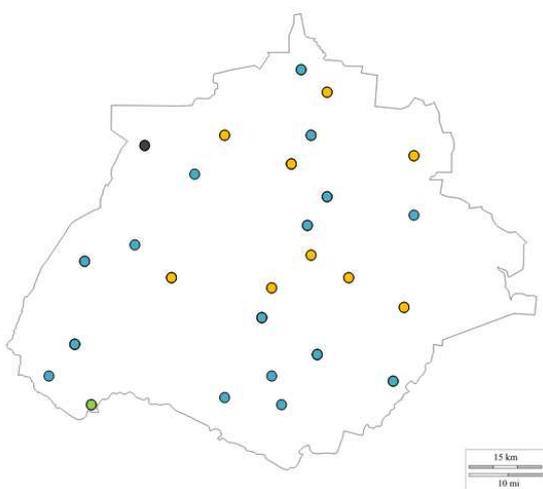
## 7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

A partir de este punto se van a analizar los resultados obtenidos a partir de los datos diarios de cada una de la estaciones gracias a nuestra herramienta programada con Excel, obteniendo de esta manera los índices de lluvia batiente, el valor de la presión eólica simultánea a la precipitación y el índice de riesgo a la penetración del agua para cada una de las estaciones. En el Anexo I del estudio podremos encontrar información detallada de todas y cada una de las estaciones, incluyendo los gráficos direccionales de exposición a la lluvia batiente y presión eólica según la orientación considerada para la fachada.

### 7.1. ANÁLISIS INDIVIDUAL.

En el presente punto vamos a tratar de hacer un análisis e interpretación individual de los resultados. Individualmente e independientemente analizaremos los tres estados los cuales son nuestro objeto de estudio. A través de varios mapas representativos observaremos cuales son los puntos más o menos expuestos de la geografía de cada estado para el daDRI y el DRWP, para ello los analizaremos conjuntamente para cada estado pudiendo ver así un balance individual de la exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea.

#### 7.1.1. PARÁMETROS daDRI y DRWP AGUASCALIENTES.



**Figura 7.** Mapa exposición daDRI de las estaciones de Aguascalientes.

<i>daDRI (m<sup>2</sup>/s)</i>		
<i>Intervalos de exposición</i>	<i>Nº estaciones</i>	<i>%</i>
0 – 0.5	16	59
0.5 – 1	9	33
1 – 1.5	1	4
>1.5	1	4

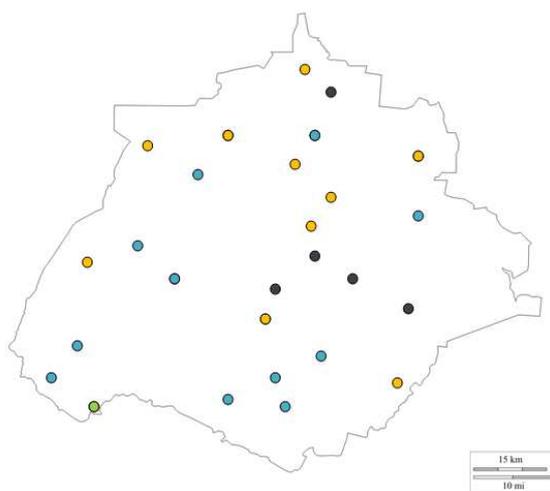
**Tabla 4.** Intervalo de exposición daDRI Aguascalientes.

Al analizar el índice de lluvia batiente podemos observar una distribución bastante homogénea del mismo. Observando el mapa en el cual se muestra la orografía de este estado podemos ver como las estaciones con más exposición son las que se encuentran en las cadenas montañosas como Sierra Tepezalá en el noroeste, Sierra Fría o la sierra de El Laurel en la zona suroeste.

Las estaciones con menor exposición se encuentran ubicadas principalmente en la Meseta Central y en el fondo de los valles, es decir, en el comienzo de las cadenas montañosas.

Cabe destacar dos estaciones las cuales destacan por encima de las demás que son El Laurel y Piletas, las cuales poseen un valor superior a uno, debido a su emplazamiento, situadas las dos por encima de los 2500 metros sobre el nivel del mar.

A continuación pasaremos a analizar el DRWP:



**Figura 8.** Mapa exposición DRWP de las estaciones de Aguascalientes.

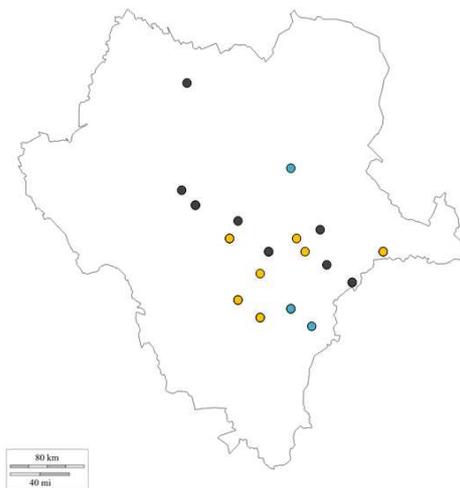
<i>DRWP (Pa)</i>		
<i>Intervalos de exposición</i>	<i>Nº estaciones</i>	<i>%</i>
0 – 0.5	10	37
0.5 – 1	11	41
1 – 1.5	5	18
>1.5	1	4

**Tabla 5.** Intervalo de exposición DRWP Aguascalientes.

En esta ocasión, como en el caso anterior, podemos ver una distribución homogénea de los valores, siendo característica la concentración de estaciones con mayor exposición las situadas en la zona de la meseta central, debido al paso inminente del viento, sin tener ningún accidente geológico que lo pueda detener. Además como en el análisis del daDRI destaca nuevamente la estación de El Laurel, la cual debido a su gran altura ostenta la mayor exposición con un valor de 5.11 Pascales, siendo con diferencia la que más riesgos tendrá a la penetración del agua atmosférica.

Las estaciones con menor exposición podemos ver que como en el caso anterior son las estaciones ubicadas en los fondos de los valles, donde la exposición frente al viento es menor.

### 7.1.2. PARÁMETROS daDRI y DRWP DURANGO.



<i>daDRI (m<sup>2</sup>/s)</i>		
<i>Intervalos de exposición</i>	<i>Nº estaciones</i>	<i>%</i>
0 – 0.5	3	17
0.5 – 0.75	7	39
0.75 – 0.9	8	44
>0.9	0	0

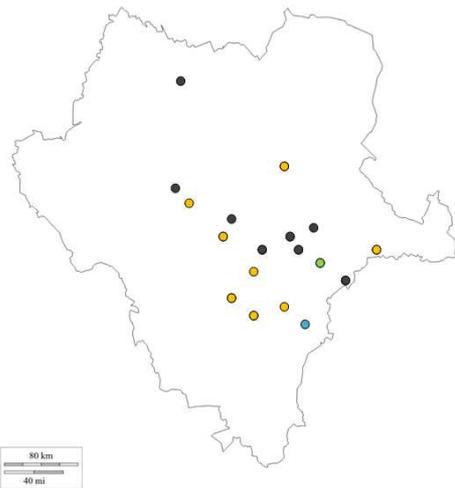
**Tabla 6.** Intervalo de exposición daDRI Durango.

**Figura 9.** Mapa exposición daDRI de las estaciones de Durango.

En esta región podemos ver como se ha mencionado en apartados anteriores que el número de estaciones con datos óptimos se localiza principalmente en la zona centro y sureste del estado, de este modo, y para la obtención de un mapa de isolíneas homogéneo se decide analizar estaciones fronterizas de estados anexos.

Observando el mapa podemos ver como la mayoría de las estaciones se encuentran en una zona climática caracterizada por un clima seco o semiseco, por ello se cuentan como en el caso de Aguascalientes con valores muy pequeños.

Posteriormente analizaremos el DRWP:



**Figura 10.** Mapa exposición DRWP de las estaciones de Durango.

<i>DRWP (Pa)</i>		
<i>Intervalos de exposición</i>	<i>Nº estaciones</i>	<i>%</i>
0 – 0.95	1	6
0.95 – 1.9	8	44
1.9 – 2.85	8	44
>2.85	1	6

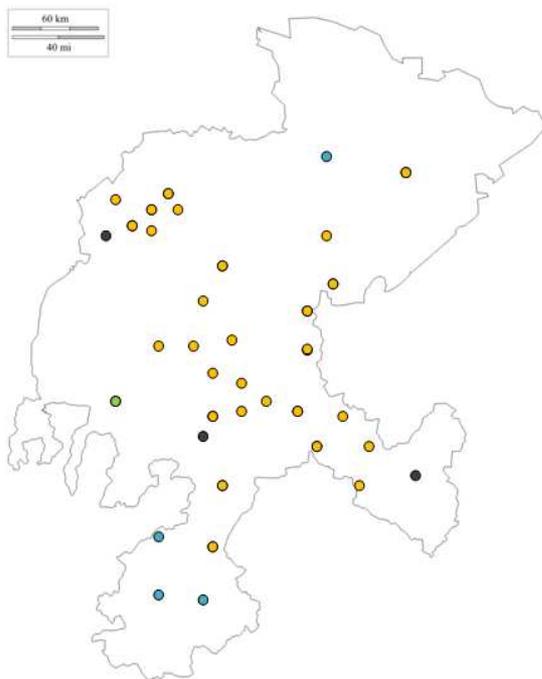
**Tabla 7.** Intervalo de exposición DRWP Durango.

En cuanto a DRWP se refiere podemos ver como hay un incremento del intervalo de exposición en comparación con Aguascalientes, este incremento puede ser debido a la gran altitud en la cual se encuentran las estaciones de Durango, con aproximadamente 2000 metros sobre el nivel del mar de media.

Además se aprecia un incremento a medida que nos acercamos a la zona noroeste donde se localizan las zonas más montañosas del estado.

En general, el valor de exposición se mantiene muy homogéneo y constante en toda la extensión de Durango, destacando el caso de Cuauhtémoc, estación situada a 2182 metros con un valor de 2.92 Pa.

### 7.1.3. PARÁMETROS daDRI y DRWP ZACATECAS.



<i>daDRI (m<sup>2</sup>/s)</i>		
<i>Intervalos de exposición</i>	<i>Nº estaciones</i>	<i>%</i>
0 – 0.5	4	11
0.5 – 1	28	78
1 – 1.5	3	8
>1.5	1	3

**Tabla 8.** Intervalo de exposición daDRI Zacatecas.

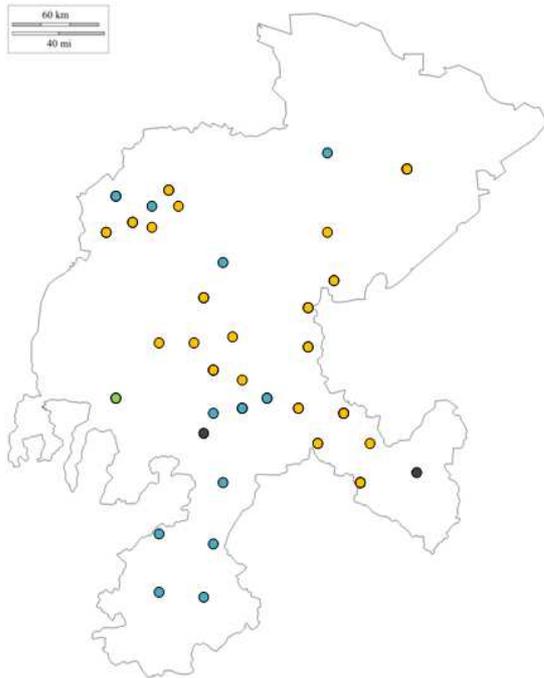
**Figura 11.** Mapa exposición daDRI de las estaciones de Zacatecas.

Como podemos observar en el mapa anterior, las estaciones con una exposición media se localizan en la zona centro del estado, situadas sobre la Meseta Central, mientras que las que poseen una mayor exposición se localizan en la periferia del estado, lindando con las regiones vecinas. Las que poseen un menor riesgo están situadas en la zona sur y suroeste como también en el norte.

Analizando los valores como en los casos anteriores podemos ver como se trata de una zona en la cual las precipitaciones brillan por su ausencia. La mayor parte de las estaciones se encuentran en clima seco o semiseco.

Destaca sobre las demás la estación CBTA Valparaiso, situada en la zona oeste del país la cual se encuentra en una zona con un clima subhúmedo, por ello la estación alcanza un valor de 2.54 m<sup>2</sup>/s.

Seguidamente estudiaremos el DRWP de Zacatecas:



**Figura 12.** Mapa exposición DRWP de las estaciones de Zacatecas.

<b>DRWP (Pa)</b>		
<b>Intervalos de exposición</b>	<b>Nº estaciones</b>	<b>%</b>
0 – 2	12	33
2 – 4	21	58
4 – 6	2	6
>6	1	3

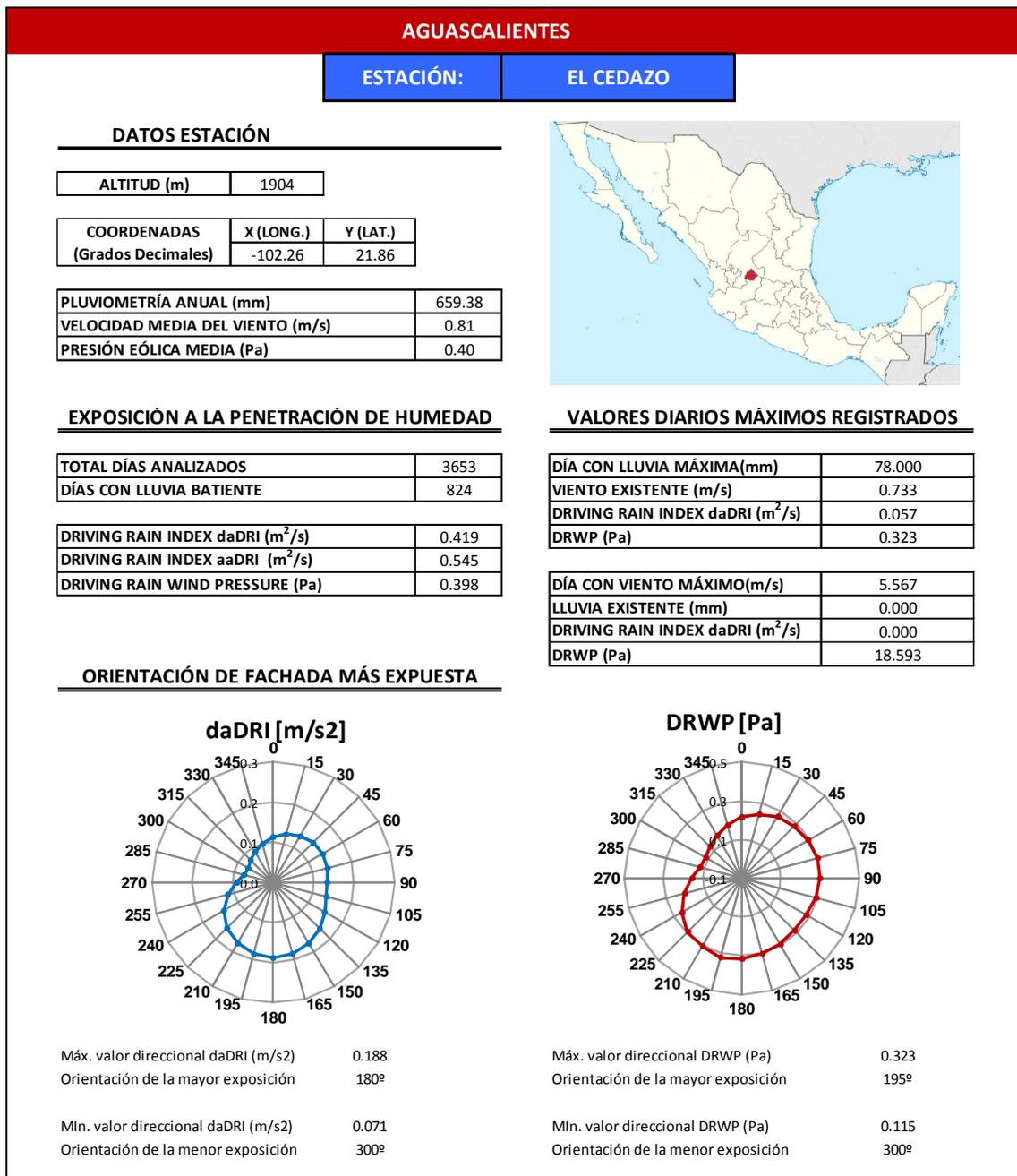
**Tabla 9.** Intervalo de exposición DRWP Zacatecas.

Las estaciones con menor exposición se localizan en la parte sur y la parte norte del estado mientras que las más expuestas se localizan en la parte central, en la parte este y noroeste de la región. Las estaciones con mayor riesgo son aquellas que se encuentran en zonas abiertas, sin grandes elevaciones próximas a ellas.

Cabe destacar la estación CBTA Valparaíso como en el caso del daDRI, poseyendo el máximo valor de todas con 6.23 Pa.

#### 7.1.4. HOJAS RESUMEN.

A continuación presentaremos la hoja resumen incluida en nuestras hojas Excel, dichas hojas o fichas se realizan con el fin de obtener un resumen detallado de cada estación como veremos seguidamente. Estas hojas se recogen en el Anexo I del presente proyecto.



**Figura 13.** Hoja resumen de El Cedazo.

En este caso, la estación representada en la imagen es El Cedazo, ubicada en Aguascalientes como se indica en la parte superior de la hoja en azul y rojo respectivamente.

Una vez definido el nombre y el estado en el que se ubica, procedemos a anotar su altura con respecto al mar (m.s.n.m), así como sus coordenadas en grados decimales además de tres datos medios característicos de la estación como la precipitación, la velocidad de viento y la presión eólica media. Anexo a los datos de la estación fijamos

un mapa en el cual resaltaremos el estado en el que se encuentre la estación meteorológica, en este caso Aguascalientes.

Bajo los datos de la estación creamos un cuadro para el análisis de la exposición a la penetración de humedad, en el cual obtendremos el número de días analizados así como los días en los que se dio la lluvia batiente, es decir, aquellos días en los que se produjo precipitación acompañada de viento. Finalmente se obtienen los valores de daDRI, aaDRI y DRWP de cada estación. En este caso particular obtenemos valores bastante bajos debido a la situación de esta estación meteorológica.

Paralelo al cuadro anterior creamos otro cuadro para anotar los valores máximos estadísticos, en concreto se obtiene el daDRI, el viento existente y el DRWP para el día con lluvia máxima de entre todos los años analizados, así como la precipitación acumulada, el daDRI y el DRWP del día con viento máximo de entre todos los años analizados. De este modo podremos ver si cuales son los valores máximos que alcanzan nuestras estaciones y si se producen como consecuencia de tormentas tropicales (daDRI muy elevado y DRWP muy elevado) o por el contrario son regiones las cuales se caracterizan por vientos débiles y pocas precipitaciones.

Finalmente en la parte inferior generamos una gráfica de exposición de daDRI y DRWP a partir de los valores direccionales, para determinar las fachadas más expuestas en función de su orientación, obteniendo además los valores máximos y mínimos conjuntamente con su orientación de fachada. Las orientaciones consideradas abarcan los 360° con un intervalo de orientación de 15°. En dichos gráficos los 0° corresponden al norte, los 90° al este, los 180° al sur y los 270° al oeste. Como podemos ver en este caso la mayor sollicitación se produce en ambos dos gráficos en las fachadas sur y sureste, siendo las fachadas orientadas al noroeste las que menor exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea tienen. En estas orientaciones de la exposición suele influir de manera decisiva la topografía de la región (confinando la dirección del régimen eólico), la naturaleza de las tormentas que llegan a la región (dirección de aproximación habitual de las borrascas y de los vientos aparejados a las mismas), y la altitud y exposición del emplazamiento.

## **7.2. ANÁLISIS GLOBAL.**

En el presente apartado vamos a proceder al análisis general de las estaciones, con el objetivo de determinar que emplazamientos de los tres estados poseen un mayor

riesgo conjunto de penetración del agua atmosférica. Para ello se analizará tanto la exposición daDRI y DRWP en los tres estados, como el valor RIWP asociado a cada ubicación.

El objeto final de dicho análisis es la obtención de mapas de exposición los cuales mediante la triangulación de los puntos obtenidos, obtendremos un mapa de isolíneas a través del programa AllPlan, en el cual se delimitarán las zonas con un mismo valor de daDRI y DRWP. Estos mapas se recogen en el Anexo III del presente estudio [31].

### 7.2.1. PARÁMETRO RIWP.

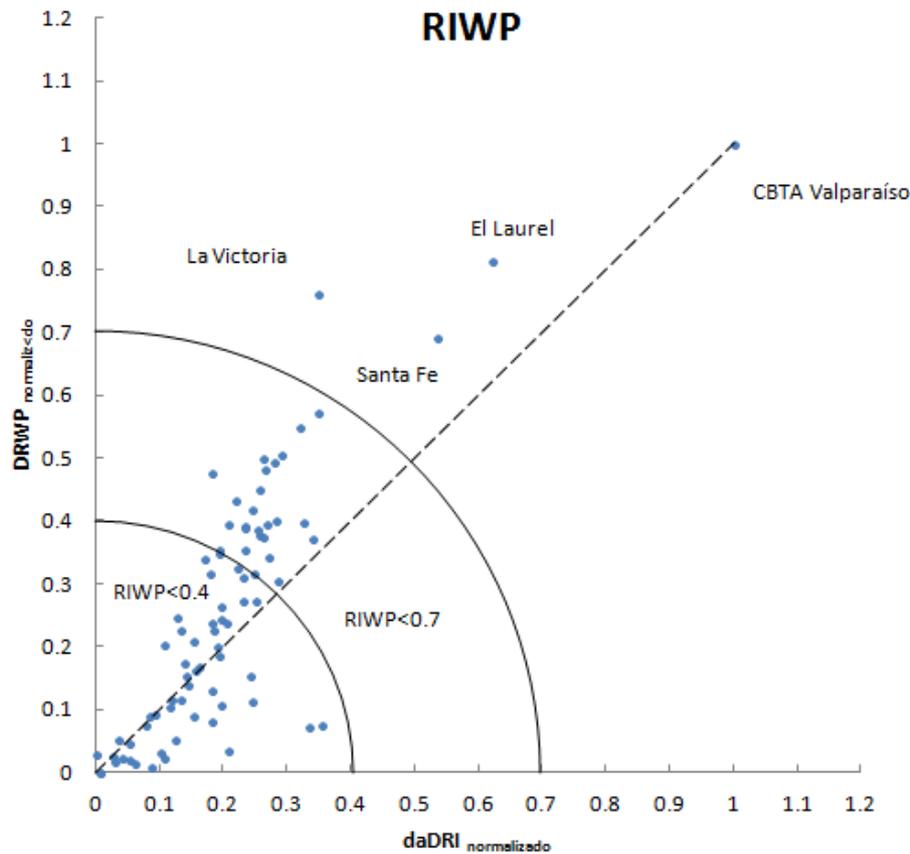
Para poder determinar finalmente el índice de riesgo comparativo a la penetración del agua en el interior de las fachadas obtendremos el RIWP. Dicho índice combina los parámetros del daDRI y el DRWP anteriormente analizados, mediante una ecuación en la cual ambos términos contribuyen de la misma manera a la obtención de este índice.

A partir de este valor obtendremos aquellas estaciones, de entre las analizadas en el estudio, con un mayor riesgo comparativo de penetración del agua atmosférica en las fachadas de nuestros tres estados.

De este modo realizaremos un análisis gráfico de los parámetros descritos en el apartado 4.3 del presente estudio, en el cual en el eje de ordenadas representaremos el DRWP<sub>normalizado</sub> y en el eje de abscisas representaremos el daDRI<sub>normalizado</sub>. A través de esta representación podremos determinar cuáles son aquellas estaciones cuyo RIWP depende más del índice de lluvia batiente o de la presión eólica simultánea a la precipitación mediante el trazo de la bisectriz del gráfico como veremos a continuación. Además aquellas estaciones que se alejen más del origen serán aquellas con un mayor riesgo, siendo " $\sqrt{2}$ " el valor máximo que se pueda llegar alcanzar coincidiendo con la longitud de la citada bisectriz.

<b>RIWP</b>	
<b>Nivel riesgo</b>	<b>Intervalo</b>
<b>Bajo</b>	0 – 0.4
<b>Medio</b>	0.4 – 0.7
<b>Alto</b>	>0.7

**Tabla 10.** Niveles de riesgo RIWP.



**Figura 14.** Análisis gráfico RIWP.

Podemos ver que predominan las estaciones por encima de la bisectriz, en las cuales el riesgo es producido principalmente por la presión eólica ejercida por el viento sobre los cerramientos verticales, frente a una minoría en el cuadrante inferior las cuales dependen principalmente de la lluvia batiente.

La mayoría de estaciones están comprendidas entre 0 y 0.7, lo que nos indica que poseen un riesgo bajo o medio de penetración principalmente debido a la escasez de lluvias, característica de los climas de los estados analizados junto con la falta de viento.

A mayor distancia con el origen mayor es el riesgo de penetración de la humedad, observando que la estación más alejada con un RIWP igual a 1.4142 (valor de la distancia al origen) es CBTA Valparaíso. Destacan también las estaciones de El Laurel, Santa Fe y La Victoria las cuales poseen un RIWP superior a 0.7 suponiendo un riesgo comparativamente alto respecto a las restantes estaciones analizadas. Dicho riesgo es provocado por el emplazamiento de las mismas: éstas se encuentran todas por encima de los 1900 metros sobre el nivel del mar, en regiones montañosas las

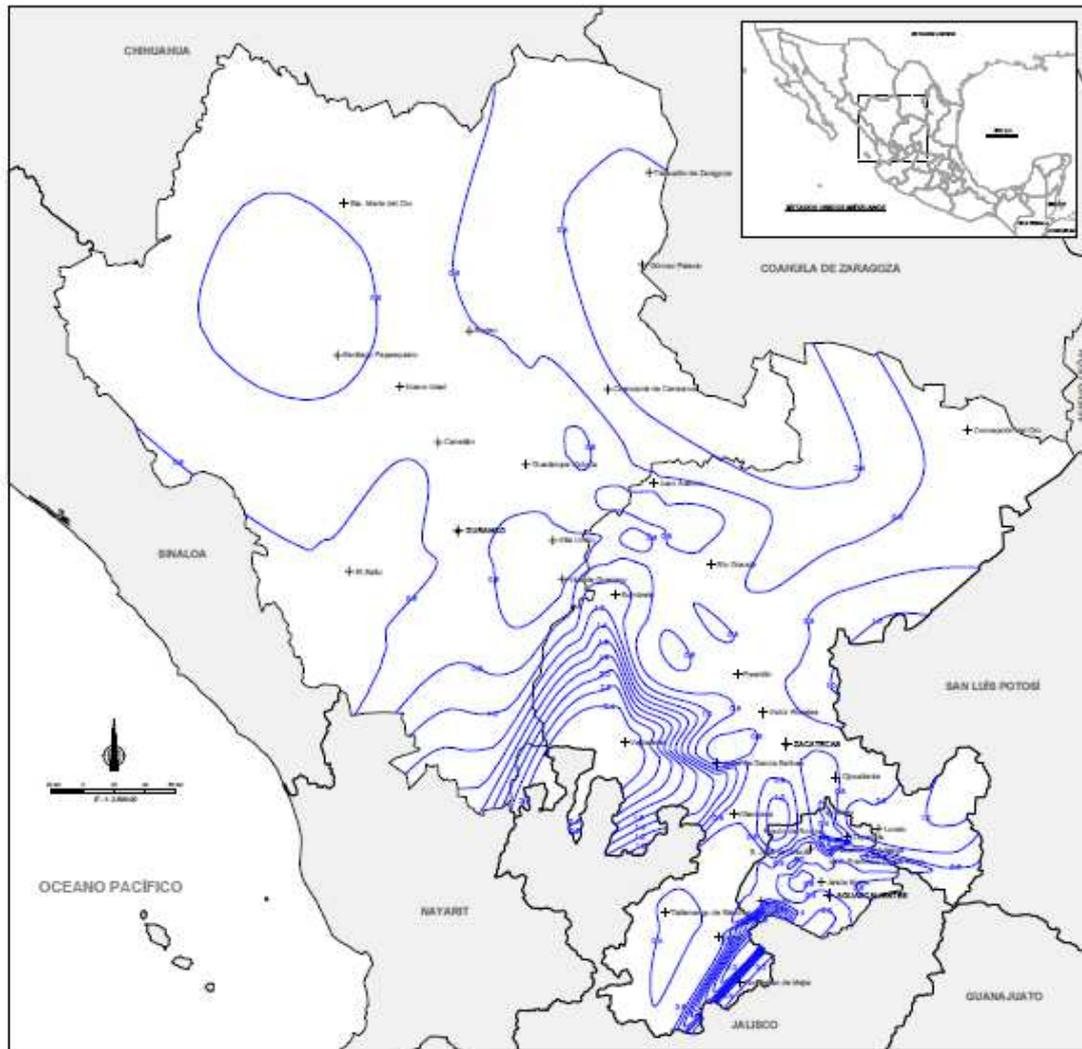
cuales están directamente expuestas a las condiciones meteorológicas y sobre las cuales inciden directamente las grandes masas húmedas provenientes del Océano Pacífico así como los vientos procedentes también del Pacífico y que se dirigen hacia el Golfo de México.

### **7.2.2. MAPAS DE EXPOSICIÓN daDRI Y DRWP.**

En este apartado procederemos al análisis de los mapas de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica que acompaña a las precipitaciones en los tres estados. Para la elaboración de estos mapas se ha usado el programa de dibujo asistido AllPlan 2016 de Nemetscheck. Gracias a este software obtenemos una serie de curvas de nivel generadas a partir de los datos obtenidos de cada una de las estaciones estudiadas, a partir de las cuales poder determinar aquellos emplazamientos con una mayor o menor exposición a estos parámetros [31].

La distribución de las curvas de nivel o isolíneas nos permitirá observar como varían los valores en cada zona, ubicando de esta manera aquellas zonas con un mismo valor de daDRI o DRWP. La calidad de estas líneas y por tanto de los mapas obtenidos dependerá de los datos de partida y del número de estaciones analizadas, a mayor número de estaciones analizadas mayor será la exactitud de los mapas obtenidos. En ocasiones, como nuestro caso, el número de estaciones analizadas está limitado por la disponibilidad y calidad de los datos de las estaciones distribuidas por las tres regiones.

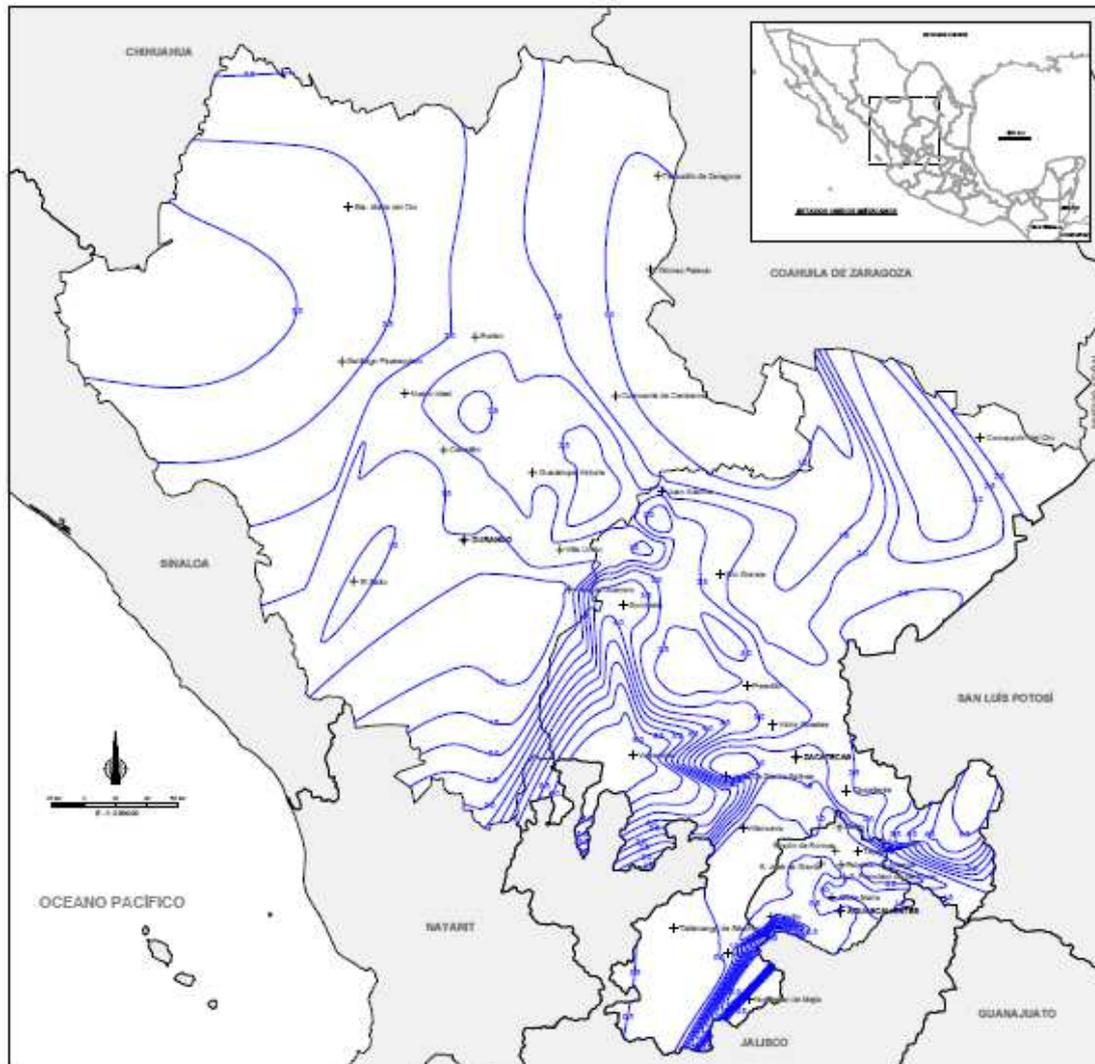
Mediante la interpolación lineal de los valores obtenidos, conociendo la ubicación de las entidades analizadas mediante sus coordenadas, el programa genera los mapas de isolíneas que se mostrarán a continuación. En ellos además de las curvas de nivel se representa la ubicación de los núcleos de población más importantes. Para una correcta visualización de los mismos, los mapas se recogen en el Anexo III del presente estudio.



**Figura 15.** Mapa daDRI. Isolineas con rango  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ . (Fuente: [31])

Observando el mapa obtenido para el daDRI nos damos cuenta que las zonas con un mayor índice de exposición a la lluvia batiente se localizan en el suroeste de Zacatecas donde vemos valores superiores a los  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ , esta exposición es principalmente debida a las grandes masas nubosas oceánicas que son arrastradas por los vientos dominantes del Océano Pacífico con componente zonal principalmente positiva, es decir, que se propaga de oeste a este; dichas masas son retenidas por las elevaciones situadas en la Sierra Madre Occidental provocando de este modo la precipitación. La zona norte, noroeste, sur y este de nuestros estados es la menos expuesta con valores muy bajos, confirmando lo descrito en el análisis climático, tratándose de zonas con clima muy seco o semiseco en el cual las precipitaciones son escasas, en las cuales por tanto el riesgo de humedecimiento de sus fachadas es mínimo. Cabe destacar un pequeño repunte del daDRI en la zona sur de Zacatecas que limita con Jalisco en la cual encontramos valores de entorno a  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ , debido

principalmente a ser zonas con gran altitud y más expuestas al viento que desvía la trayectoria de las gotas de lluvia hacia las paredes [30].



**Figura 16.** Mapa DRWP. Isótopas con rango 0.5 Pa. (Fuente:[31])

En lo que respecta a la presión eólica simultánea a la precipitación, podemos ver la exposición no es muy elevada, en ningún caso supera los 6 Pa. Como en el caso del daDRI, la zona con valores más altos se encuentra en la zona suroeste de Zacatecas donde se sitúa la Sierra Madre Occidental caracterizada por su elevada altitud (2900 msnm) en la cual ciudades como Valparaíso están más expuestas al viento.

Curiosamente y como en el caso anterior, la zona sur de Zacatecas alberga un área con un valor de 6 pascales, la cual corresponde a una zona en la cual se ubica la estación de “El Laurel” caracterizada por su altitud elevada con respecto al mar (2540 msnm), lo cual nos indica que la altitud contribuye de forma decisiva en la exposición

de las fachadas al viento, a mayor altura, mayor es la exposición al viento, y por tanto mayores son los valores de DRWP. La parte con más variabilidad corresponde a la zona norte y este del mapa caracterizada por mesetas y elevaciones que alteran e interrumpen el paso del viento proveniente del Océano Pacífico hacia el Golfo de México [28-30].

Concluyendo y poniendo en común ambos mapas, podemos ver como las zonas con mayor riesgo de penetración del agua atmosférica se ubican en las áreas donde se concentran los valores más altos de daDRI y DRWP conjuntamente, como vimos anteriormente en el análisis del RIWP. En estas zonas podemos encontrar importantes ciudades como Valparaíso (suroeste de Zacatecas), Sombrete (noroeste de Zacatecas) o Santa María del Oro (norte de Durango).

### **7.2.3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE CORRELACIONES.**

Con el fin de ampliar la información obtenida a zonas o puntos sin datos meteorológicos tan exhaustivos como los utilizados, en este apartado procederemos a la obtención y comparación de varias relaciones de ajuste. Mediante la representación gráfica de los parámetros obtendremos una línea de regresión que representará la ecuación de regresión matemática a través de la cual estimar valores a partir de otros. Para la obtención de resultados más certeros dichas correlaciones serán obtenidas para cada estado por separado, reduciendo así la dispersión de los datos.

#### **7.2.3.1. Relación DRWP – Presión eólica.**

Esta relación nos permitirá obtener los valores de presión eólica simultánea a la precipitación a partir de la presión eólica media. Es decir, en aquellos lugares en los que no contemos con registros simultáneos de viento y lluvia se podrá determinar el valor de DRWP a partir de la presión eólica media a través de las ecuaciones que se mostrarán en cada gráfico. Como veremos a continuación para el caso de Aguascalientes y Durango el coeficiente  $R^2$  está bastante próximo a "1" lo que indica una muy buena exactitud de la correlación, siendo poco exacta en el caso de Zacatecas.

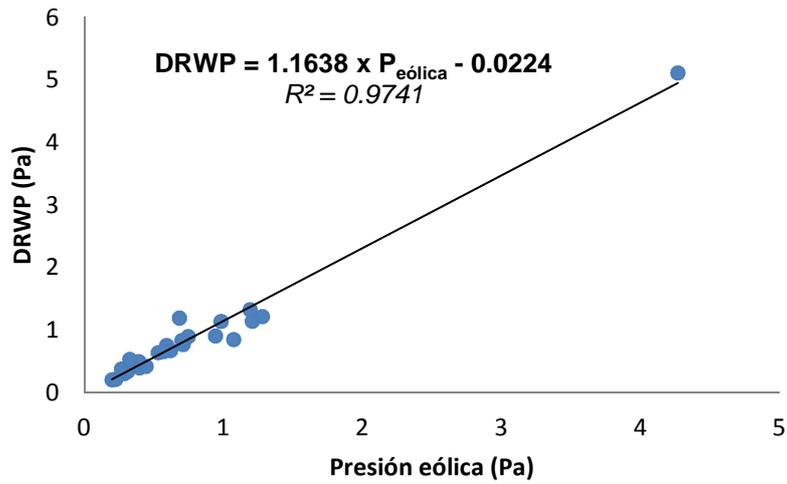


Figura 17. Gráfico DRWP – P.E. Aguascalientes.

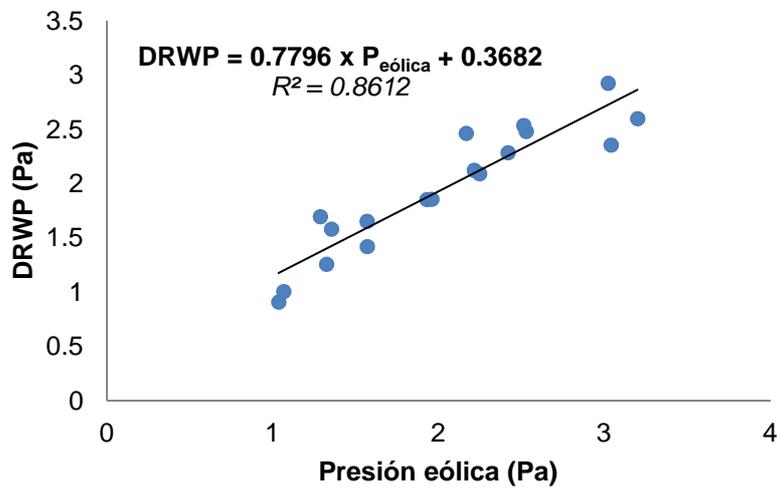


Figura 18. Gráfico DRWP – P.E. Durango.

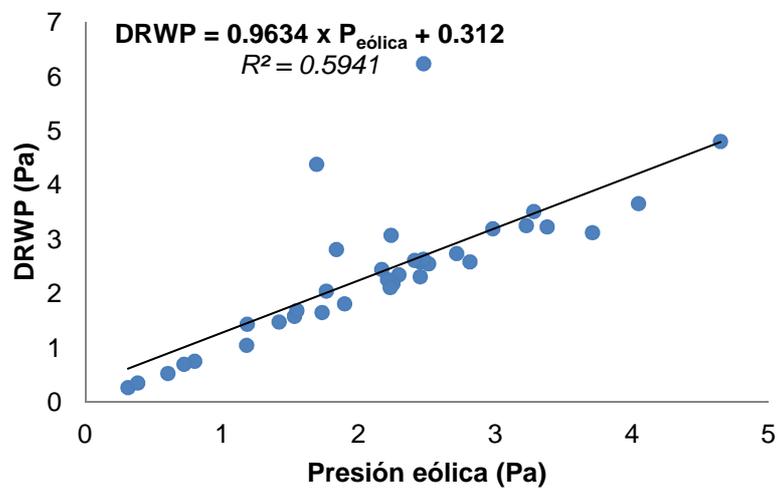


Figura 19. Gráfico DRWP – P.E. Zacatecas.

### 7.2.3.2. Relación Precipitación – daDRI.

Esta correlación es una de las más importantes para la tarea que nos ocupa. Si existiera una buena correlación entre la precipitación media y el índice de lluvia batiente, no sería necesario analizar simultáneamente los registros de viento y precipitación, y por tanto, no sería necesario todo el cálculo desarrollado en el presente trabajo.

Esta correlación es por ejemplo empleada de forma inadecuada por el Código Técnico de la Edificación español, que extrapola el grado de impermeabilidad requerido en las fachadas, a partir de los registros pluviométricos habituales (CTE DB-HS1). No obstante, se comprueba también en México, como no existe ninguna correlación entre ambos parámetros climáticos, lo que justifica la necesidad de realizar los exhaustivos cálculos desarrollados en el trabajo. De esta manera y justificando nuestro trabajo, obtenemos aproximaciones muy malas de esta relación al obtener valores muy bajos de  $R^2$  (0,43 en Aguascalientes; 0,15 en Durango y 0,34 en Zacatecas).

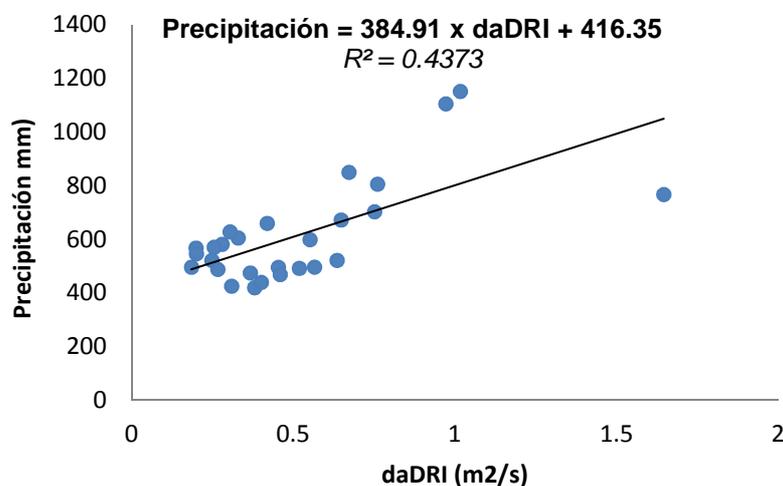
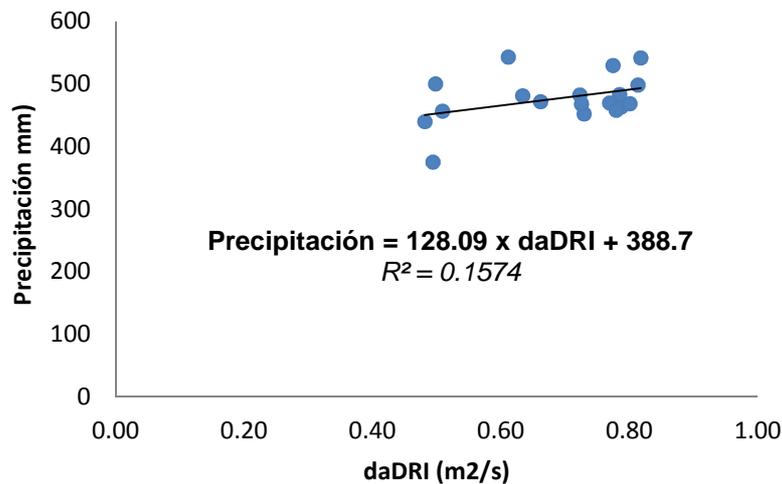
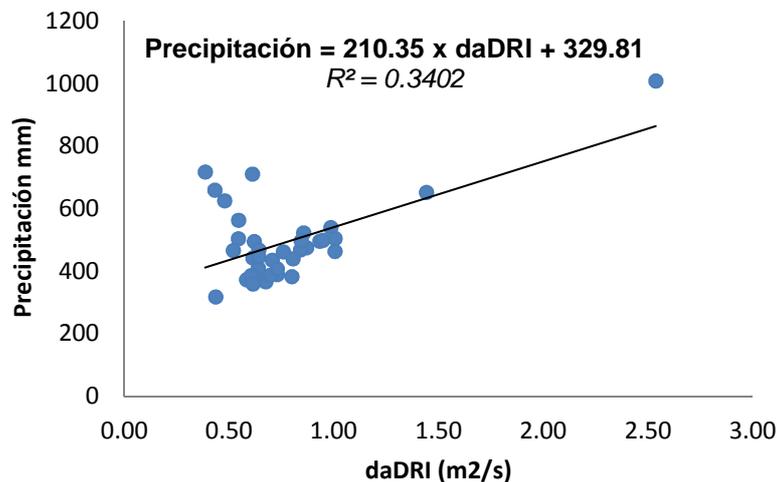


Figura 20. Gráfico Precipitación – daDRI Aguascalientes.



**Figura 21.** Gráfico Precipitación – daDRI Durango.



**Figura 22.** Gráfico Precipitación – daDRI Zacatecas.

### 7.2.3.3. Relación daDRI – DRWP.

En este caso como ocurre con la correlación anterior, obtener una relación exacta de estos dos parámetros nos permitiría extrapolar el uno a partir del otro, invalidando la necesidad de realizar el trabajo realizado. Como veremos a continuación obtenemos correlaciones con un grado de exactitud bajo, al obtener valores de  $R^2$  bajos. Por consiguiente, y tal y como ya habíamos adelantado, será posible obtener emplazamientos caracterizados por un bajo aporte de lluvia batiente y altas presiones simultáneas, y viceversa. Se deduce por tanto la importancia de caracterizar un índice integrado para ambas exposiciones, como es el indicador RIWP.

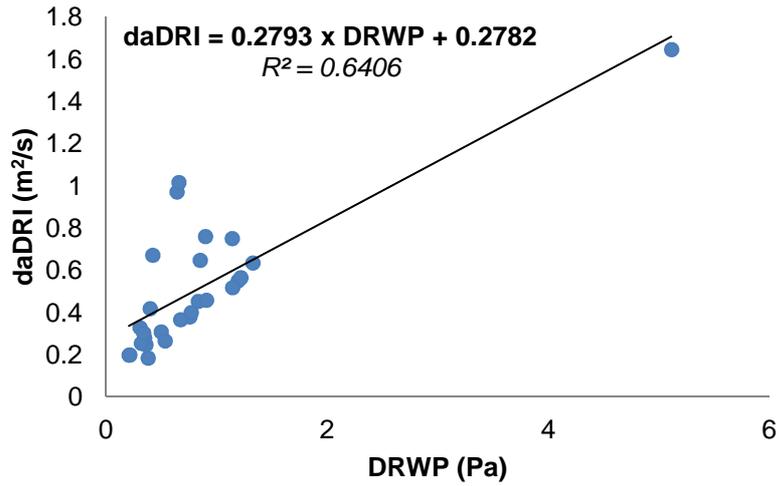


Figura 23. Gráfico daDRI – DRWP Aguascalientes.

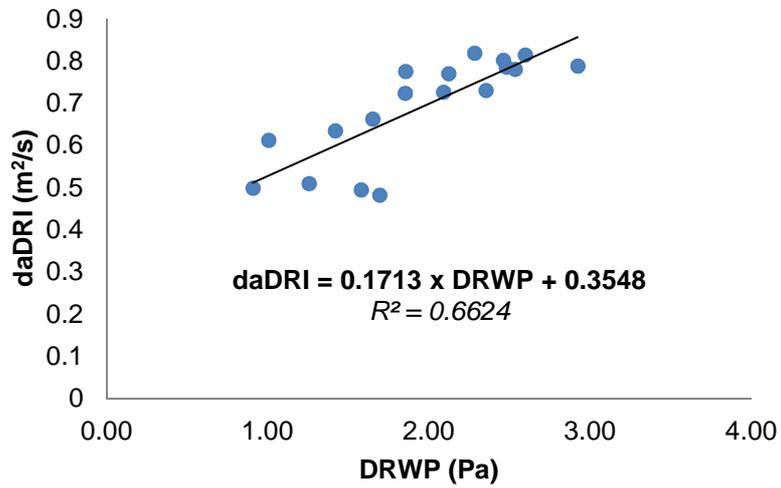


Figura 24. Gráfico daDRI – DRWP Durango.

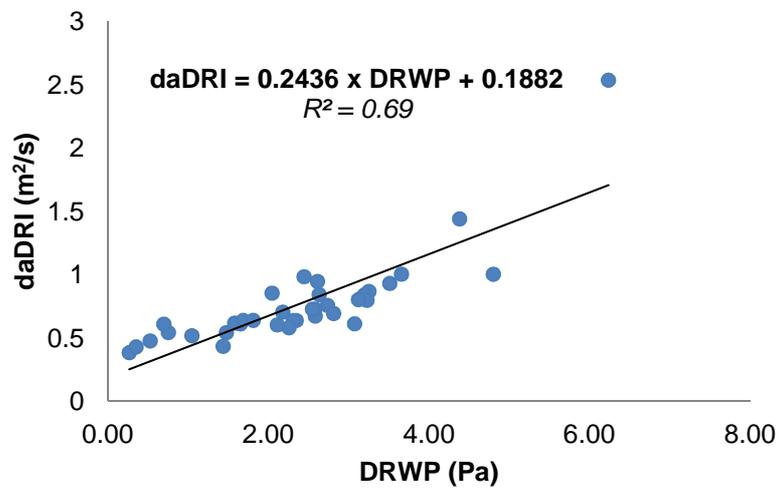


Figura 25. Gráfico daDRI – DRWP Zacatecas.

#### 7.2.3.4. Relación daDRI – aaDRI.

Gracias a esta correlación podremos obtener valores de daDRI a partir de registros climáticos medios anuales. Es decir, a partir de la velocidad media de viento para cada año y la precipitación total acumulada los mismos años obtendremos su respectivos índices aaDRI. Posteriormente promediaremos en función del número de años analizados obteniendo el aaDRI de cada estación, para finalmente a partir de las siguientes correlaciones obtener el valor del índice de lluvia batiente para datos diarios promedio. Dicha relación es interesante para aquellos puntos en los que poseemos datos medios anuales y no diarios (es decir, registros climáticos menos exhaustivos), pudiendo obtener de este modo resultados más exactos.

Para esta relación se obtienen ecuaciones que aproximan con bastante exactitud los valores obtenidos.

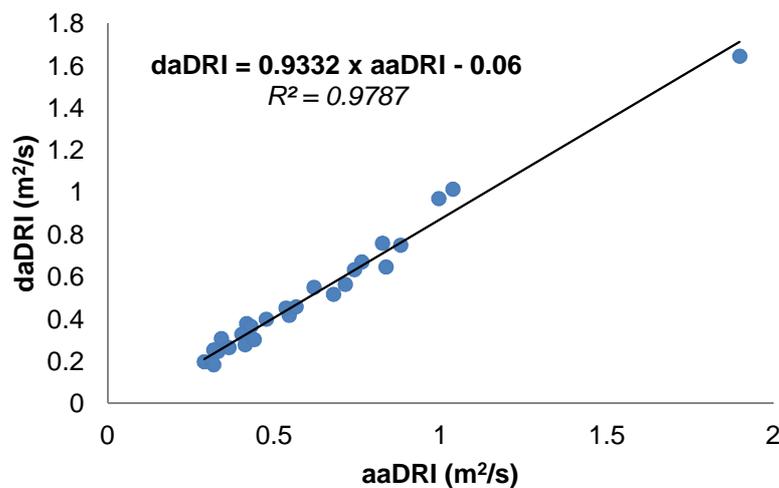


Figura 26. Gráfico daDRI – aaDRI Aguascalientes.

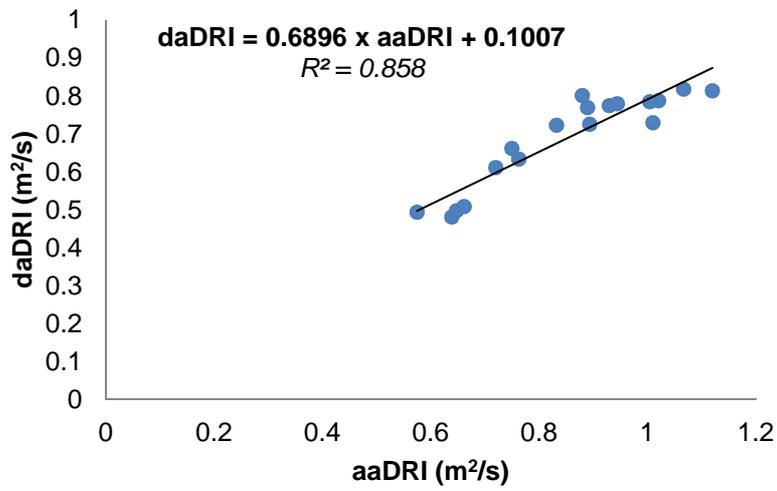


Figura 27. Gráfico daDRI – aaDRI Durango.

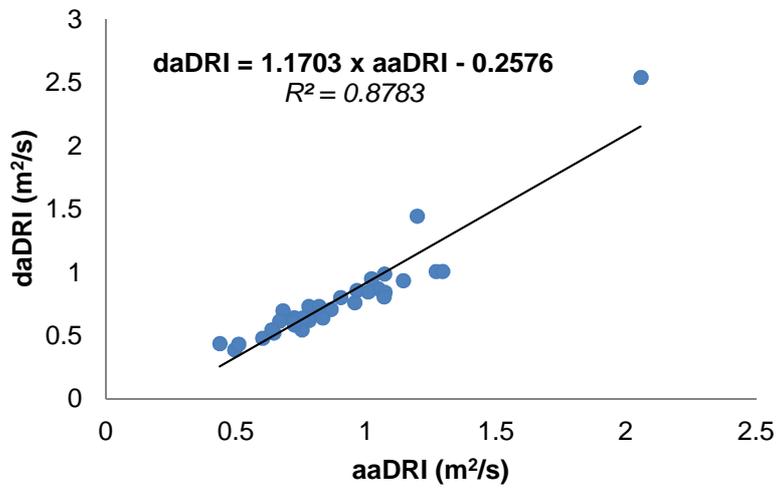


Figura 28. Gráfico daDRI – aaDRI Zacatecas.

## **8. CONCLUSIONES.**

Actualmente en los Estados Unidos Mexicanos no existe ningún documento técnico en el cual se determine la sollicitación por lluvia batiente de las fachadas de los edificios, ni el riesgo de penetración de las precipitaciones en el interior de las mismas. No se consideran así las graves afecciones que este problema puede ocasionar a las personas que en ellos habitan.

Con el fin de obtener una solución a este problema se han aplicado un conjunto de procedimientos de cálculo internacionalmente reconocidos los cuales permiten obtener con exactitud la sollicitación por humedad de los cerramientos exteriores de los edificios, lo que puede contribuir a que las autoridades mexicanas establezcan requerimientos de diseño para los cerramientos, ajustados a los niveles de exposición existentes en cada zona.

Para conseguirlo ha sido necesario analizar un ingente número de datos meteorológicos, lo que ha permitido definir la lluvia batiente, es decir la lluvia cuya trayectoria es desviada por la acción del viento, así como la presión eólica que acompaña a estas precipitaciones producidas por el empuje del viento sobre los cerramientos, factores ambos responsables de la incursión del agua en las paredes.

Una vez desarrollada la metodología se ha realizado un completo análisis de las estaciones meteorológicas ubicadas en los estados de Aguascalientes, Durango y Zacatecas, descartando aquellas que poseían registros inferiores a 8 años, garantizando de este modo una caracterización fiable de las condiciones climáticas del entorno y obteniendo, de esta forma, resultados válidos y objetivos.

A través de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas se ha obtenido el índice de exposición a la lluvia batiente así como la presión simultánea a la precipitación para cada una de ellas. Conociendo incluso cual es la fachada más expuesta a estos dos parámetros en función de su orientación.

Mediante la aplicación de correlaciones se han obtenido una serie de ecuaciones fiables que permiten obtener datos a partir de otros registros, permitiendo de este modo conocer valores de zonas caracterizadas por la falta de estaciones meteorológicas con datos meteorológicos exhaustivos.

Gracias a la herramienta AllPlan se han generado mapas de curvas de nivel o isolíneas, las cuales recogen aquellas áreas de los estados con un mismo índice de

lluvia batiente y de presión eólica simultánea a la precipitación. Dichos mapas nos permiten realizar una rápida valoración de las zonas con mayor exposición a los parámetros anteriores, facilitando al técnico la valoración del riesgo de penetración del agua atmosférica en el interior de los cerramientos.

El desarrollo de nuevos estudios de alguno de los estados de los Estados Unidos Mexicanos sería interesante para una comparación con este estudio, así como para la complementación de las normas técnicas mexicanas tan incompletas en cuanto a esta materia se refiere. También la incorporación de un mayor número de estaciones repartidas por el estado de Durango o Zacatecas, o la utilización de datos más exhaustivos (horarios, diezminutales), y correspondientes a series históricas de datos de mayor extensión (20 años).

En cualquier caso, y a pesar de las limitaciones impuestas por los datos disponibles, el estudio tiene unas características muy similares a los más recientemente elaborados en otras zonas, y una precisión superior a la que caracteriza a estudios realizados en pasadas décadas, normalmente elaborados con datos precarios basados en resúmenes mensuales. Por todo ello, se espera que contribuya en el futuro a mejorar los diseños de fachadas en México, determinando soluciones de estanqueidad realmente ajustadas a las solicitudes por humedad que se producen en cada emplazamiento o región.

## 9. BIBLIOGRAFÍA.

1. **Broto, C. (2006).** *Enciclopedia Broto de las patologías de la construcción.* Barcelona: Links Barcelona, S.A.
2. **Lozano, A., Lozano, G., del Coz, J.J. (2006).** *Curso: Síndrome, patología y terapéutica de las humedades.*
3. **Sanders, C. (1996).** *Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts: Environmental conditions.* Final report, Annex 24, Vol. 2. Leuven: International Energy Agency.
4. **Del Coz, J.J., Rabanal, F.P., García, P.J., Domínguez, J., Rodríguez, B., Pérez, J.M. (2013).** Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study.
5. **Bornehag, C.G., Blomquist, G., Gyntelberg, F., Järholm, B., Malmberg, P., Nordvall, L., Nielsen, A., Pershagen, G., Sundell, J. (2001).** Dampness in buildings and health.
6. **World Health Organization (2011).** *Environmental burden of disease associated with inadequate housing. Methods for quantifying health impacts of selected housing risks in the WHO European Region.*
7. **Código de la edificación de la vivienda.** <https://www.gob.mx/cev.pdf>
8. **Review and improvement of the water tightness degree required by the CTE DB-HS1 for building façades.** J.M. Pérez-Bella, J. Domínguez-Hernández, B. Rodríguez-Soria, J.J. del Coz-Díaz, E. Cano-Suñén.
9. **Cornick, S.M., Lacasse, M.A. (2005).** A review of climate loads relevant to assessing the watertightness performance of walls, windows, and wall-window interfaces.
10. **Red Mexicana de estaciones agrometeorológicas automatizadas.** <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones>
11. **Gaceta oficial 6 de octubre 2004 tomo I.** <http://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.ph>
12. **Gaceta oficial 6 de octubre 2004 tomo II.** <http://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.php>
13. **Código técnico de la edificación.**
14. **Hoppestad, S. (1955).** *Slagregn i Norge (Lluvia batiente en Noruega, en noruego).* Report no. 13. Oslo: Norwegian Building Research Institute.

15. **Lacy, R.E. (1965).** Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings. En *Proceedings of RILEM/CIB symposium on moisture problems in buildings*. Helsinki.
16. **Sahal, N. (2006).** Proposed approach for defining climate regions for Turkey based on annual driving rain index and heating degree-days for building envelope design. *Building and Environment*
17. **Giarma, C., Aravantinos, D. (2011).** Estimation of building components' exposure to moisture in Greece based on wind, rainfall and other climatic data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*.
18. **Pérez, J.M., Domínguez, J., Rodríguez, B., del Coz, J.J., Cano, E. (2012).** Estimation of the exposure to moisture in Spain from daily wind and rain data. *Building and Environment*.
19. **CEN. (2009).** *EN ISO 15927-3 Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. European Committee for Standardization.
20. **ASTM. (2009).** *ASTM E331-00. Standard test method for water penetration of exterior windows, skylights, doors, and curtain walls by uniform static air pressure difference*. American Society for Testing and Materials.
21. **Servicio Meteorológico Nacional.** [www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)
22. **Instituto nacional de estadística y geografía.** <http://www.inegi.org.mx>
23. **Gobierno del estado de Aguascalientes.** <http://www.aguascalientes.gob.mx/>
24. **Dirección de meteorología.** <http://meteorologia.semar.gob.mx/>
25. **Gobierno del estado de Durango.** <http://www.durango.gob.mx/>
26. **Climate-data.org** [es.climate-data.org](http://es.climate-data.org)
27. **Gobierno del estado de Zacatecas.** <http://www.zacatecas.gob.mx/>
28. **Geografía Aguascalientes.** <https://es.wikipedia.org/wiki/Aguascalientes>
29. **Geografía Durango.** <https://es.wikipedia.org/wiki/Durango>
30. **Geografía Zacatecas.** <https://es.wikipedia.org/wiki/Zacatecas>
31. **Allplan 2016.** Nemetschek Allplan GmbH, Munich. <https://campus.allplan.com>