
Metodología para la determinación de índices de vulnerabilidad ante escenarios Natech y su implementación para la inclusión en la gestión territorial del AMVA

FECHA:
Marzo de 2022

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Nombre:	Contrato para el desarrollo de actividades científicas y tecnológicas No.716 de 2021
Objeto:	Metodología para la determinación de índices de vulnerabilidad ante escenarios Natech para su inclusión en la gestión territorial del AMVA
Suscrito entre:	Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad EAFIT.



UNIVERSIDAD EAFIT

Oscar Geovany Bedoya Sanmiguel, Director General.

Geólogo, Universidad EAFIT

Master en Ciencia, Colorado State University (USA)

Marco Fidel Gamboa Ramírez, Coordinador Técnico.

Ingeniero Geólogo, Facultad de Minas, Medellín.

Especialista en Sistemas de Información Geográficos de la Universidad San Buenaventura Medellín.

MSc (c) en Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT.

Equipo amenazas naturales

Jorge Alonso Prieto, Ingeniero Civil

Master of Science, Planeamiento de Centrales Hidroeléctricas

Master of Science, Mecánica de suelos, y sismología

PhD en Ingeniería

William Gerardo Suárez, Ingeniero Civil

Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones.

Sebastián Villa Ochoa, Ingeniero Civil

Msc. Ingeniería de Recursos Hidráulicos.

Milena González Gómez, Geóloga.

Geóloga, Universidad EAFIT

Especialista en Gerencia del Medio Ambiente y Prevención de Desastres.

Equipo amenazas tecnológicas

María Camila Suárez Paba, Ingeniera Química

Magíster en ingeniería química

Doctora en Ingeniería

Rafael Amaya Gómez, Ingeniero Químico

Máster en Ingeniería Química

Pregrado en Matemáticas

Doctor en Ingeniería

Docteur en Sciences de l'ingénierie

Componente cartográfico

Juan David Ángel Giraldo, Ingeniero Civil

MSc (c) en Sistemas de Información Geográfica – SIG. UNIGIS América Latina, Universidad de Salzburgo - Austria.

Juan Carlos Giraldo, Historiador

Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ -AMVA

Gustavo Londoño Gaviria, Profesional Universitario – Q.E.P.D

Ingeniero Químico – Universidad de Antioquia

Especialista en Gestión Ambiental - Universidad de Antioquia.

Máster en Ecoauditorías y Planificación Empresarial de Medio Ambiente del Instituto de Investigaciones Ecológicas.

Julieta Cecilia Gómez Gómez, Profesional Universitario

Geóloga Universidad Eafit.

Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática, Universidad de Antioquia

Aarón Arias Araya, Contratista de apoyo Unidad de Gestión del Riesgo – Subdirección Ambiental

Ingeniero Civil - Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

M.Sc. Recursos y Medio Ambiente Hídrico - Universidad de Chile

Andrea Solano Arias, Contratista de apoyo Unidad de Gestión del Riesgo – Subdirección Ambiental

Ingeniera Química – Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Máster en Ciencias Biotecnología – Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Luisa Fernanda López Rivera, Contratista de apoyo Unidad de Gestión del Riesgo –
Subdirección Ambiental

Geóloga - Universidad EAFIT.

Especialista en mecánica de suelos y cimentaciones, universidad EAFIT

Luis Miguel Osorio Sierra, Contratista de apoyo SIATA

Geólogo, Universidad EAFIT

Shirley Arenas Ángel, Contratista de apoyo Unidad de Gestión del Riesgo – Subdirección
Ambiental

Ingeniera Química – Universidad de Antioquia

Especialista en Gerencia de la Salud Ocupacional – Institución Universitaria María Cano

Máster en gestión integrada: Medio Ambiente, Calidad y prevención de riesgos- Universidad
de León

Orly Tatiana Castañeda Rojas, Profesional Universitaria

Ingeniera Civil - Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Especialista en Prevención y Atención de Desastres- Tecnológico de Antioquia

M.Sc. Geotecnia - Universidad de Brasilia

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. NATECH Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS	14
3. INTERACCIÓN FENÓMENOS NATURALES Y VULNERABILIDAD	19
4. AMENAZAS Y PARÁMETROS DE INTENSIDAD-REVISIÓN DOCUMENTAL	22
4.1 AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES.....	22
4.2 PARÁMETROS DE INTENSIDAD PARA LA AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES .	23
4.2.1 Flujo de momento ($h v^2$).....	23
4.2.2 Densidad de flujo de escombros (ρ).....	23
4.2.3 Coeficiente de arrastre (C_d).....	24
4.2.4 Coeficiente de fuerza de impacto de escombros (K_d).....	24
4.3 AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	24
4.3.1 Etapa de deformación lenta	27
4.3.2 Etapa de falla.....	28
4.4 PARÁMETROS DE INTENSIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA	31
4.4.1 Velocidad del movimiento (m/s):.....	33
4.4.2 Deformación local.....	36
4.4.3 Profundidad de deslizamiento	37
4.5 SINTESIS DE PARÁMETROS DE INTENSIDAD UTILIZADOS EN FUNCIÓN DE LAS AMENAZAS	38
5. MAPA DE RIESGO QUÍMICO-CONTEXTO PREVIO	46
6. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH.....	51
6.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH PARA ZONAS DEL AMVA CON PRESENCIA DE INSTALACIONES INDUSTRIALES FIJAS	51
6.1.1 Generalidades del riesgo Natech y su importancia en el ordenamiento territorial.....	51
6.2 PROCESO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH....	56
6.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA: VULNERABILIDAD ANTE EVENTOS NATECH	58
6.4 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN MRQ Y OTROS	64
6.4.1 Eventos atendidos por el cuerpo de bomberos.....	64
6.4.2 Eventos atendidos por riesgo tecnológico	66
6.4.3 Revisión de amenazas naturales y sustancias químicas peligrosas	67
6.4.4 Conclusiones sobre información revisada.....	75
6.5 DEFINICIÓN DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH	75
6.6 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN NATECH	97
6.7 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN DE RIESGO NATECH	99
7. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DE LA CONDICIÓN DE RIESGO NATECH	101
7.1 PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN: PASO A PASO.....	101
7.2 CONSTRUCCIÓN MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES	110
7.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DEL MRQ: ALGUNAS CONSIDERACIONES	111

8.	RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	113
8.1	ESCENARIO DE INUNDACIÓN	114
8.2	ESCENARIO DE AVENIDA TORRENCIAL	119
8.3	ESCENARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	123
9.	MEDIDAS DE REDUCCIÓN ANTE ESCENARIOS DE RIESGO NATECH.....	128
10.	RECOMENDACIONES	128
10.1	PARA LA INDUSTRIA	132
10.2	PARA LAS AUTORIDADES LOCALES Y LOS TOMADORES DE DECISIONES	133
10.3	PARA LAS ENTIDADES DE RESPUESTA A EMERGENCIAS	134
10.4	RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL AMVA.....	135
11.	CONCLUSIONES	140
	GLOSARIO	142
12.	REFERENCIAS.....	151
	ANEXO 1. LISTA SUSTANCIAS MRQ-2017	162
	ANEXO 2. UMBRALES MÁXIMOS PARA ALGUNAS SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS DEL MRQ QUE NO CONTENÍAN DICHA INFORMACIÓN	166
	ANEXO 3. MAPAS DETALLADOS DE ÍNDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL	168
	ANEXO 4. MAPAS DE INSTALACIONES INDUSTRIALES CON ÍNDICE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL ASOCIADO A DIFERENTES AMENAZAS NATURALES.....	172
	ANEXO 5. PELIGROSIDAD DE SUSTANCIAS QUE REACCIÓNAN CON EL AGUA.....	177
	ANEXO 6. INFORMACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE INTENSIDAD DE FENÓMENOS NATURALES	179

ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Funciones de fragilidad Relación Intensidad Daño (probabilidad).....</i>	20
<i>Ilustración 2. Funciones de vulnerabilidad. Relación Intensidad-Pérdida. Nótese que la pérdida promedio esperada está expresada como una fracción del valor nuevo o valor de reposición de un bien.</i>	20
<i>Ilustración 3. Zonas de exposición de los elementos ante un deslizamiento, tomado de Guía metodológica SGC versión 24-05-2016.....</i>	25
<i>Ilustración 4. Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. .</i>	34
<i>Ilustración 5. Definición de las variables H y L para la estimación de la velocidad de caída, tomado de Iverson, 1997.....</i>	35
<i>Ilustración 6. Municipios que componen el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Tomado de (AMVA - UNIANDES, 2017)</i>	46
<i>Ilustración 7. Instalaciones en el Valle de Aburrá. Tomado de Ref. (AMVA - UNIANDES, 2017).....</i>	49
<i>Ilustración 8. Distribución por tipo de entidad. Tomado de Ref. (AMVA - UNIANDES, 2017)</i>	50
<i>Ilustración 9. Dinámica accidental evento Natech (Fuente: Elaboración propia).</i>	53
<i>Ilustración 10. Esquema de secuencia de eventos de un accidente. Adaptado de Bahr (2015).</i>	53
<i>Ilustración 11. Esquema general de los posibles accidentes dado una liberación accidental (Casal, Montiel, Planas, & Vílchez, 1999).</i>	54
<i>Ilustración 12. Marco de análisis de un evento Natech (Fuente: Elaboración propia).....</i>	57
<i>Ilustración 13. Proceso metodológico para la construcción del índice de vulnerabilidad (Fuente: Elaboración propia).....</i>	58
<i>Ilustración 14. Esquemas de modos de falla por inundación por deslizamiento, flotación o pandeo de tanque vertical. Adaptado de Khakzad & Van Gelder (2018)...</i>	60
<i>Ilustración 15. Ejemplo de red bayesiana para la evaluación de la probabilidad de falla por inundación. Tomado de Khakzad & Van Gelder (2018).....</i>	61
<i>Ilustración 16. Resultados de Gao et al. (2021) para la amenaza de inundación en el cinturón económico del río Yangtze.....</i>	62
<i>Ilustración 17. Distribución de instalaciones de mayor peligro de un accidente mayor, tomado de Ancione & Milazzo (2021).....</i>	63
<i>Ilustración 18. Tipología de eventos reportados por bomberos entre 2018-2021 (marzo). Fuente: Elaboración propia</i>	64
<i>Ilustración 19. Número de eventos atendidos por riesgo tecnológico en el AMVA Fuente: Elaboración propia.</i>	66
<i>Ilustración 20. Tipología de accidentes tecnológicos en el Valle de Aburrá 2009-2020 Fuente: Elaboración propia</i>	67
<i>Ilustración 21. Distribución de empresas por municipio y tipo de equipo Fuente: Elaboración propia.....</i>	69
<i>Ilustración 22. Distribución de equipos en zonas de amenaza alta Fuente: Elaboración propia.....</i>	70

<i>Ilustración 23. Distribución de equipos en zonas de amenaza alta Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 24. Categorías de información propuestas de acuerdo con información suministrada por el AMVA.....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 25. Parámetros preliminares para construir el índice de vulnerabilidad. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 26. Densidad industrial en el Valle de Aburrá de acuerdo con la proximidad de las instalaciones industriales.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 27. Esquema propuesto de la cadena de eventos contemplados para evaluar el índice de vulnerabilidad Natech. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 28. Isocontornos de evacuación de 50 m para las instalaciones ubicadas en el Valle de Aburrá</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 29. Niveles de amenaza por la combinación de intensidad y recurrencia. Color verde – amenaza baja, color amarillo – amenaza media y color rojo- amenaza alta. Tomado de (Ancione & Milazzo, 2021).....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 30. Amenaza empírica de inundación. Tomada de (Kvočka, Falconer, & Bray, 2016).....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 31. Ejemplos de curvas de fragilidad para el desplazamiento de tanques dado una inundación. Información tomada de (Yang, Chen, & Reniers, 2020) ..</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 32. Esquema de simulaciones de Monte Carlo usado por cada combinación de velocidad y altura de inundación. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 33. Resultados de P_f para los daños estructurales por pandeo (izquierda) y desplazamiento (derecha).....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 34. Curva de fragilidad con base en los resultados por las simulaciones de Monte Carlo.....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 35. Relación entre β y $P[R]$ para la distribución normal, del Factor de Seguridad (Assis, 2002- tomado de Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011).....</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 36. Árbol lógico de decisión sobre la susceptibilidad del equipo a fallar y provocar una pérdida de contención. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 37 Procedimiento cartográfico para la definición del índice de exposición.</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 38. Metodología general para la estimación de condición de riesgo</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 39 Esquema lógico del índice de condición de riesgo Natech.....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 40.División por zonas para identificación y visualización de instalaciones industriales en el Valle de Aburra con diferentes niveles de peligrosidad industrial. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 41. Densidad industrial según diferentes búferes. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 42. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligrosidad industrial para el escenario de inundación</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 43. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de inundación. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 44. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de inundación.</i>	<i>117</i>

<i>Ilustración 45. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de inundación.</i>	118
<i>Ilustración 46. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligro para el escenario de avenida torrencial.....</i>	119
<i>Ilustración 47. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de avenida torrencial. Fuente: Elaboración propia.</i>	121
<i>Ilustración 48. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de avenida torrencial.</i>	122
<i>Ilustración 49. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de avenida torrencial.....</i>	122
<i>Ilustración 50. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligro para el escenario de movimiento en masa.....</i>	123
<i>Ilustración 51. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de movimientos en masa. Fuente: Elaboración propia.....</i>	125
<i>Ilustración 52. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de movimiento en masa.</i>	126
<i>Ilustración 53. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de movimiento en masa.....</i>	127
<i>Ilustración 554. Estabilidad detonante lluvia Tr 50 años, INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.</i>	192

TABLAS

<i>Tabla 1. Zonas o escenarios de exposición, tomado de guía metodológica SGC.....</i>	26
<i>Tabla 2. Valor de intensidad por deformación, tomado de Du et al. (2013).....</i>	27
<i>Tabla 3. Coeficientes α and β en Eq. 7 para diferentes tipos de estructuras, tomado de Du et al. (2013) (2013).....</i>	29
<i>Tabla 4. Valores del parámetro de intensidad de presión de impacto, presión de impacto/presión límite horizontal de la estructura (tomado de Du et al. (2013)).</i>	29
<i>Tabla 5. Presión de falla según tipología de estructura (tomado de Du et al. (2013))</i>	30
<i>Tabla 6. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura, tomado de Du et al. (2013)</i>	30
<i>Tabla 7 Ensayos que se recomienda realizar sobre las muestras obtenidas</i>	32
<i>Tabla 8. Valores estimados de la relación L/H, tomado de Iverson 1997</i>	36
<i>Tabla 9. a y b en función de la deformación del terreno y el tipo de estructura</i>	37
<i>Tabla 10. Relación entre el daño a la construcción y la deformación de la superficie del terreno – Tomado de Chen, et al (2011).....</i>	37

Tabla 11. Recopilación de modelos de vulnerabilidad, fragilidad, o riesgos empleados en la evaluación de los impactos y las consecuencias de los peligros del flujo de escombros.	39
Tabla 12. Revisión de literatura sobre análisis de vulnerabilidad Natech por fenómenos de inundación.....	59
Tabla 13. Clasificación de peligrosidad de sustancias involucradas en eventos atendidos por el cuerpo de bomberos. Fuente: Elaboración propia	65
Tabla 14. Caracterización base de datos amenazas naturales y SQP	67
Tabla 15. Distribución de tipo de equipos por municipio en amenaza alta	70
Tabla 16. Distribución de sustancias peligrosas por municipio en amenaza alta.....	72
Tabla 17. Clasificación según NFPA de sustancias más peligrosas identificadas en el MRQ	74
Tabla 18. Variables asociadas con la cadena de eventos que desencadenan en un evento Natech.....	79
Tabla 19. Descripción de variables para el cálculo del índice de vulnerabilidad Natech... ..	81
Tabla 20. Clasificación del peligro de inundación. Adaptado de (Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E., 2017)	86
Tabla 21. Variables aleatorias implementadas para describir los parámetros de diseño y del fenómeno de inundación	88
Tabla 22. Índices de confiabilidad objetivo y probabilidades de falla admisibles	93
Tabla 23. Actitudes hacia el riesgo (tomado de Martínez Montes, et al 2007).....	94
Tabla 24. Calificaciones asignadas a las categorías de usos actuales del suelo – POT. .	97
Tabla 25. Calificaciones asignadas a las categorías de clasificación del suelo – POT.....	98
Tabla 26. Calificaciones asignadas a las categorías de equipamientos – POT.....	98
Tabla 27. Resultados evaluación por pares para la estimación del índice de peligrosidad	110
Tabla 28. Resultados del vector de prioridad	111
Tabla 29. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de inundación.....	115
Tabla 30. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de avenida torrencial.....	120
Tabla 31. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de movimiento en masa	124

1. INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), como entidad administrativa conformada por los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello Medellín, Itagüí, Envigado, Caldas, Sabaneta y La Estrella, está encargada de consolidar el progreso y desarrollo armónico de la gran Región Metropolitana; con funciones de planeación, de autoridad ambiental y de transporte público colectivo individual de pasajeros con radio de acción metropolitano y masivo de pasajeros. De acuerdo con la Ley 1625 de 2013, incluye dentro de sus funciones “Realizar actividades de análisis, seguimiento, prevención y control de desastres, en coordinación con las demás autoridades competentes, y asistirles en los aspectos medioambientales en la prevención y atención de emergencias y desastres...”.

Por un lado, la entidad cuenta con el Plan de Gestión 2020-2023 “Futuro Sostenible”, que tiene como uno de sus ejes estructurales la Sostenibilidad Ambiental dentro del cual se aborda el programa de “Gestión Inteligente del Riesgo de Desastres”. Por otro lado, la entidad posee el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano (PIDM) 2021-2032, donde se especifican líneas de análisis como Aburrá Resiliente (Línea 1) y Gestión Sistémica Ambiental (Línea 4), los cuales hacen las veces de hoja de ruta para la organización. En este sentido se ha identificado la necesidad de un soporte científico y académico para el desarrollo de una metodología de gestión de riesgo Natech enfocado en instalaciones industriales fijas ubicadas en el Valle de Aburrá. Por lo que ha encontrado como socio estratégico a la Universidad EAFIT para llevar a cabo el diseño de esta metodología a través del presente proyecto.

El proyecto consiste en el diseño de una metodología que permita identificar áreas vulnerables ante escenarios Natech y proponer medidas para su gestión territorial por parte del Área. Las instalaciones industriales fijas que cobijan a este proyecto están ubicadas en el Valle de Aburrá, y cumplen con la característica de manipular o almacenar sustancias peligrosas en áreas susceptibles a eventos de inundaciones, avenidas torrenciales y/o movimientos en masa.

El presente documento contiene inicialmente unos antecedentes de este tipo de eventos y posteriormente se identifican los parámetros de intensidad asociados a los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa que deberán ser tenidos en cuenta en el análisis del índice de vulnerabilidad ante escenarios Natech, como parte de los compromisos contractuales para el desarrollo del contrato No.716 de 2021.

Por otro lado, en la revisión de antecedentes e información secundaria realizada para desarrollar el proyecto, se ha encontrado que existe muy poca información sobre eventos Natech asociados a movimientos en masa y avenidas torrenciales, la mayor parte de la información se encuentra asociada a fenómenos de inundación, tsunamis y sismos, constituyendo esto un reto adicional del proyecto dadas las características del Valle de Aburrá.

Posteriormente, se desarrolla la metodología para la evaluación del índice de vulnerabilidad Natech, donde además de los parámetros de intensidad de los fenómenos naturales, se encuentran los parámetros asociados a las instalaciones industriales fijas. De igual manera, se presenta la metodología para la determinación de la Condición de Riesgo Natech.

Finalmente, se presenta la implementación de la metodología para la determinación del índice de vulnerabilidad, se realiza la identificación de zonas con condición de riesgo por eventos Natech, y a partir de los resultados, se formularon las recomendaciones para permitir la inclusión de este tipo de eventos en la gestión territorial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

2. NATECH Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

A lo largo de la historia industrial a nivel mundial, se han presentado eventos accidentales que han provocado la liberación de sustancias peligrosas y desencadenados escenarios de contaminación ambiental, incendio y/o explosión. Algunos de estos accidentes, han dejado huellas imborrables en la historia por sus graves consecuencias, elevado número de víctimas, daños materiales significativos y afectaciones en los ecosistemas.

Existen diferentes factores que pueden desencadenar accidentes industriales mayores, y aquellos provocados por eventos de origen natural son una categoría relevante. El término *Natech* viene del acrónimo en inglés *Natural Hazards-Triggered Technological Accidents*, acuñado por primera vez por Showalter y Myers en 1994. Este tipo de eventos complejos se estudiaron por primera vez a fines de la década de 1970 y en los últimos años han ganado importancia debido a su tendencia creciente (Cruz & Suarez-Paba, 2019).

A pesar de que se han realizado diversos esfuerzos de investigación sobre la gestión de riesgos Natech, enfocados en diferentes amenazas de origen natural como precursores de tales escenarios aún se desconocen elementos específicos que los caracterizan. Específicamente, la afectación y daños que genera el fenómeno natural a los equipos de proceso, así como los escenarios finales, siguen siendo motivo de investigación (Cozzani et al., 2010). Estos elementos son clave para el análisis, evaluación e identificación de riesgos y peligros asociados en una industria, así como herramientas para su prevención, mitigación y tratamiento. Es por esta razón que el análisis de lecciones aprendidas cobra relevancia, toda vez que permite aprender de eventos Natech pasados y comprender su dinámica accidental, con el fin de proporcionar herramientas y medidas para estar mejor preparados ante futuros escenarios accidentales.

El retorno de experiencias ha permitido identificar que los accidentes Natech pueden ser provocados por diferentes tipos de eventos naturales, categorizados de acuerdo con su origen, en cuatro macro categorías: 1) eventos de origen geofísico como terremotos, deslizamientos de tierra, actividad volcánica y tsunamis, 2) eventos de origen meteorológico tales como lluvias, tormentas eléctricas, tormentas tropicales y temperaturas extremas, 3) eventos de origen hidrológico como las inundaciones y 4) eventos de origen climatológico como los incendios forestales (Ricci, Casson Moreno, & Cozzani, 2021)

En los inicios de la interacción entre fenómenos naturales e instalaciones industriales, los eventos sísmicos fueron los que causaron los accidentes tecnológicos más severos (Cozzani et al., 2010). Es por esta razón que la investigación asociada a los eventos Natech se centró primero en los terremotos como el principal evento desencadenante, y, por ende, ya se cuenta con métodos para la evaluación de fallas de los equipos de proceso, sus efectos y curvas de fragilidad, entre otros (Kiremidjian et al., 1985). Posteriormente, la investigación se enfocó en los fenómenos hidrometeorológicos, y más recientemente en estudios multi-amenaza y enfoques transversales (Suarez-Paba, Perreux, Muñoz, & Cruz, 2019). Sin embargo, en un estudio realizado por Cozzani y colaboradores en 2010, se

recolectaron datos sobre accidentes Natech provocados por inundaciones, de algunas de las principales bases de datos de accidentes industriales. Los datos fueron tomados de cinco bases de datos europeas (ARIA, FACTS, MARS, MHIDAS y TAD), una base de datos de Estados Unidos (NRC) y de la literatura abierta.

En la mayoría de los casos, se presentaron dificultades para obtener información clara y detallada de los accidentes. Se encontró que el objetivo de los expedientes era el de informar datos sobre las consecuencias finales del accidente, descuidando así los datos sobre daños estructurales o sobre las características del evento natural que causaron el escenario final. A pesar de estas dificultades, el estudio permitió analizar el impacto de los eventos Natech provocados por inundaciones previas, en los modos de daño de los equipos de proceso. Cozzani y sus colegas identificaron el alcance esperado de la liberación de los tanques de almacenamiento afectados por las inundaciones. Para lo cual se desarrollaron posteriormente árboles de eventos de sustancias específicas que luego pueden respaldar la evaluación cuantitativa del riesgo (Cozzani et al., 2010).

Bajo esta misma perspectiva Ricci y colaboradores en 2020, presentaron un análisis integral de la ocurrencia de accidentes Natech que afectan la industria de procesos. Recopilaron y analizaron un conjunto de 9100 accidentes ocurridos en los últimos 70 años, con el objetivo de comprender la tendencia de estos accidentes, su distribución geográfica, los escenarios tecnológicos finales y las consecuencias asociadas en términos de pérdidas humanas y daños a los activos. Se encontró que los eventos meteorológicos, como tormentas, temperaturas extremas y rayos, fueron los principales desencadenantes de los accidentes Natech (86%).

En Brasil, De Moura & De Sousa, tras un accidente Natech ocurrido a lo largo de la costa de Sao Paulo en 2013 a causa de un evento de precipitación, decidieron adelantar una investigación en torno a la disponibilidad de datos de accidentes brasileños, con el objetivo de apoyar la discusión sobre la creciente frecuencia y extensión de los eventos Natech, y la importancia del riesgo que representan para los humanos, las instalaciones industriales peligrosas ubicadas en áreas propensas a la ocurrencia de estos eventos.

En este accidente, luego de una intensa lluvia se produjeron deslizamientos de tierra e inundaciones, afectando al menos dos instalaciones petroleras y una planta de tratamiento de agua potable ubicada en la cuenta del Río Cubatao. Los deslizamientos provocaron un flujo de escombros de aproximadamente 200 metros de altura, causando la destrucción de una parte de los pilotes de la planta de tratamiento y arrastrando cinco cilindros de cloro gaseoso, cada uno con una capacidad individual de 900 kg. A pesar de que fue un hecho reciente, no hay información sobre la cantidad de cloro efectivamente perdido y el posible daño a la vida acuática.

Las tuberías de transporte también son un activo que puede verse afectado por eventos de origen natural. Un estudio de la Comisión Europea y particularmente del JRC en 2014 identificó la ocurrencia de 1850 eventos Natech de esta naturaleza en el mundo. Las fuentes de información consideradas para este estudio fueron 1) la base de datos de incidentes de la Administración de Seguridad de Tuberías y Peligros del Departamento de Transporte de los EE. UU., 2) la base de datos del Centro Nacional de Respuesta de EE. UU., y para

Europa, 3) la base de datos francesa ARIA, 4) información de EGIG y 5) CONCAWE (Girgin & Krausmann, 2014).

El análisis evidenció que los fenómenos naturales representan una amenaza alta para los oleoductos, gasoductos y tuberías de transporte de materiales peligrosos en general. Se encontró que, del conjunto de datos de Estados Unidos, las amenazas geológicas desencadenaron el 37% de los eventos Natech en oleoductos en tierra (*onshore*). En segundo lugar, los fenómenos meteorológicos con el 29%, y, en tercer lugar, los fenómenos hidrológicos y climáticos con el 14% cada uno. De este panorama de afectaciones a tuberías de transporte por efectos de los eventos de origen natural, se encontró que los deslizamientos de tierra son el principal peligro geológico para este tipo de infraestructura con el 46% de los incidentes analizados, mientras que los terremotos representan solo el 9% dentro de esta categoría. Por otra parte, dentro de los fenómenos meteorológicos, los rayos son la mayor amenaza con el 36% de los incidentes Natech reportados mientras que, para los fenómenos hidrológicos, el 86% de los eventos Natech tuvieron como causa raíz eventos de inundaciones. Otro elemento que suele no tenerse en cuenta en el contexto colombiano, pero que cobra relevancia en latitudes de fuertes inviernos, son los fenómenos asociados con el clima frío (ej. heladas, bajas temperaturas), las cuales, según el estudio, representan el 94% de los eventos Natech causados por condiciones climáticas adversas.

Dentro de las consecuencias asociadas a los impactos en oleoductos y gasoductos por efectos de eventos de origen natural, la ignición es el escenario más representativo en gasoductos con un 25% de los casos analizados y 8% para otro tipo de sustancias. El escenario de explosión, por su parte, se presentó sólo en el 3% de los gasoductos y en el 2% de otras sustancias peligrosas. El estudio determinó que la ocurrencia de eventos Natech en tuberías de transporte de materiales peligrosos representan una amenaza principalmente para los ecosistemas, puesto que más de dos tercios de las liberaciones afectaron cuerpos de agua continentales en primera instancia, y generaron emisiones en tierra en el 25% de los casos (Girgin & Krausmann, 2014).

Es así como a pesar de la creciente atención que se dedica a la gestión de riesgos Natech, todavía no existe un seguimiento sistemático de las instalaciones, parques industriales y tuberías de transporte de materiales peligrosos, ubicados en zonas propensas a la ocurrencia de eventos de origen natural, lo que conlleva a la falta de un monitoreo sistemático de los accidentes Natech (Krausmann et al., 2019). La coherencia y el nivel de detalle de los datos disponibles sobre accidentes pasados son un problema importante que a menudo dificulta la posibilidad de aprender de estos. En el caso de accidentes causados por fenómenos naturales este aspecto es aún más relevante, puesto que las bases de datos de accidentes industriales a menudo no están diseñadas para almacenar y clasificar información sobre el evento de origen natural desencadenante (Cozzani et al., 2010).

Lo anterior demuestra la importancia de crear bases de datos de accidentes industriales que involucren pérdidas de contención y que contemplen como causa raíz a los eventos de origen natural. Esto constituye un componente esencial para entender aspectos importantes de los eventos Natech, como lo son el tipo y extensión territorial de los daños, y la existencia y eficacia de planes de respuesta a emergencias, entre otros aspectos. También, el análisis

de este tipo de información nutre el retorno de experiencias y permite desarrollar o mejorar modelos simplificados de vulnerabilidad de equipos, que pueden ser utilizados en el análisis cuantitativo de riesgos (Krausmann et al., 2011).

En la región conurbada del Valle de Aburrá, la autoridad ambiental territorial interesada, en conjunto con otros organismos del sistema nacional para la gestión del riesgo de desastres, desde el 2009 ha venido recopilando información sobre las emergencias atendidas por eventos tecnológicos en el Valle de Aburrá. Como hecho relevante, en el año 2019 se registró una emergencia en la vereda Ancón 2 por un evento Natech desencadenado por un movimiento en masa que generó la rotura del gasoducto en la zona y la liberación del material al ambiente. Como medida mitigativa, se generó la suspensión del bombeo tanto en el poliducto como en el gasoducto y la evacuación de más de 112 familias que habitaban la zona (Ramírez Gil, 2019; AMVA, 2019). Posteriormente, en el 2020 se presentaron dos movimientos en masa en los meses de septiembre y noviembre, en el municipio de Medellín que en dos ocasiones pusieron en peligro tanques de almacenamiento de combustible en una estación de servicio (EDS Texaco Nuevas Palmas). Uno de los escenarios reporta un movimiento en masa e inundación que afectó el terreno aledaño a la EDS, sin embargo, nunca se tuvo liberación accidental de una sustancia química peligrosa. La estación de servicio involucrada en el incidente se encuentra ubicada en la vía Las Palmas, una de las principales vías de comunicación terrestre de esta ciudad y la región oriental cercana del departamento de Antioquia. Es así como situaciones como estas son ahora una preocupación creciente para las autoridades reguladoras y para la industria en general, particularmente en áreas propensas a eventos de origen natural.

Con base en lo anteriormente expuesto, se destaca la necesidad de recuperar datos relevantes para el análisis tanto cualitativo como cuantitativo de riesgos que contemple los eventos de origen natural involucrados, la sustancia liberada, el inventario, dimensiones y materiales de construcción de los equipos afectados, los modos de falla que llevaron a la pérdida de contención, la presencia de barreras físicas que redujeron el impacto del evento natural en el equipo, la secuencia de eventos relacionados con la dispersión de la sustancia en el agua, el suelo o en la atmósfera, la ocurrencia de explosiones e incendios, los bienes socioambientales afectados, los escenarios causados por el evento de origen natural, las actividades de remediación, la eficacia de las acciones de respuesta a emergencias implementadas y las lecciones aprendidas, entre otros (De Moura & De Sousa, 2016).

El registro sistemático de accidentes Natech, deberá respaldar el análisis de su ocurrencia a escalas temporales y espaciales, proporcionando datos sobre factores como la intensidad y la frecuencia de ocurrencia, que son esenciales para realizar un análisis cuantitativo del riesgo, y con base a esto, conocer la importancia del riesgo que representan para los seres humanos, las instalaciones industriales peligrosas, como resultado de posibles accidentes provocados por fenómenos naturales (De Moura & De Sousa, 2016).

Por lo tanto, la juiciosa recopilación de datos asociados a incidentes y accidentes Natech en el territorio, permitirá nutrir el retorno de experiencias y brindar información importante para robustecer los sistemas de gestión del riesgo de desastres. Al consolidar un sistema de recolección de información de este tipo, el AMVA podrá contar con información de detalle

que le permitirá seguir avanzando y liderando los procesos de gestión del riesgo Natech en el país.

3. INTERACCIÓN FENÓMENOS NATURALES Y VULNERABILIDAD

La interacción entre amenazas naturales y vulnerabilidades de sistemas, como los tecnológicos, para propósitos de evaluación de riesgo, se expresa mediante relaciones cualitativas, semi-cuantitativas o cuantitativas que vinculan las intensidades de los fenómenos amenazantes con la vulnerabilidad de dichos sistemas. Los avances en investigación han permitido utilizar cada vez más relaciones cuantitativas, en especial funciones matemáticas cuyas variables de entrada se relacionan con la intensidad de un fenómeno, por ejemplo, fuerza latente (o la presión máxima esperada, o la velocidad, o la energía cinética, etc.) en un fenómeno geológico, y donde la variable de salida se relaciona con la resistencia, es decir, la medida de la vulnerabilidad, de un componente de un sistema, como podría ser uno tecnológico. La resistencia y, por tanto, la vulnerabilidad de los elementos amenazados se puede medir de manera empírica en términos sociales, económicos o físicos. El concepto de daño se refiere a un resultado adverso de la interacción amenaza-elemento, como el agrietamiento, fisuración, de un componente del sistema por el impacto de un evento geológico. En tanto que la pérdida se refiere a una cuantificación del daño en términos usualmente monetarios también puede ser en términos sociales. Aunque las pérdidas se pueden expresar de manera continua entre, por ejemplo, un valor monetario de cero (0) y un valor equivalente al valor nuevo de reposición de un bien y el daño también se podría expresar de manera continua comenzando con una afectación mínima del bien (grietas muy pequeñas) hasta la destrucción total del mismo (agrietamientos, deformaciones que hacen imposible utilizarlo nuevamente), en la práctica, el daño se califica con más facilidad en elementos discretos, es decir “niveles de daño”, por ejemplo, nivel 1: no daño, nivel 2: daño leve, nivel 3: daño moderado, nivel 4: daño extenso, etc. Desde luego, la calificación de daño en niveles diferentes no excluye la posibilidad de que ciertos componentes de un sistema puedan sufrir 2 o 1 solo nivel de daño. Por ejemplo, un equipo puede o no dañarse o dañarse completamente.

La diferenciación entre pérdidas y daños da lugar a 2 tipos de funciones que se amparan bajo el nombre genérico de vulnerabilidad, pero que en realidad son diferentes:

- a) Función de fragilidad: expresa una relación entre intensidad del fenómeno y el nivel de daño, más exactamente entre una intensidad y la probabilidad de estar en o exceder un nivel dado de daño (por tanto, varía entre 0 y 1).
- b) Función de vulnerabilidad en sentido estricto: se refiere a una relación entre la intensidad del fenómeno y la pérdida social o monetaria (que puede normalizarse para tener valores máximos de 1) promedio.

Nótese que el conocimiento de la fragilidad permite la determinación de la vulnerabilidad (porque es posible conocer la pérdida promedio cuando se conoce la pérdida asociada a cada nivel de daño, es decir, la pérdida promedio se calcula como la suma del producto de una pérdida cuando ocurre un estado de daño multiplicada por la probabilidad de estar en

un estado de daño), pero no a la inversa, en otras palabras, no es posible conocer la fragilidad si se conoce solo la vulnerabilidad. Ejemplos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad se muestran en las ilustraciones 1 y 2.

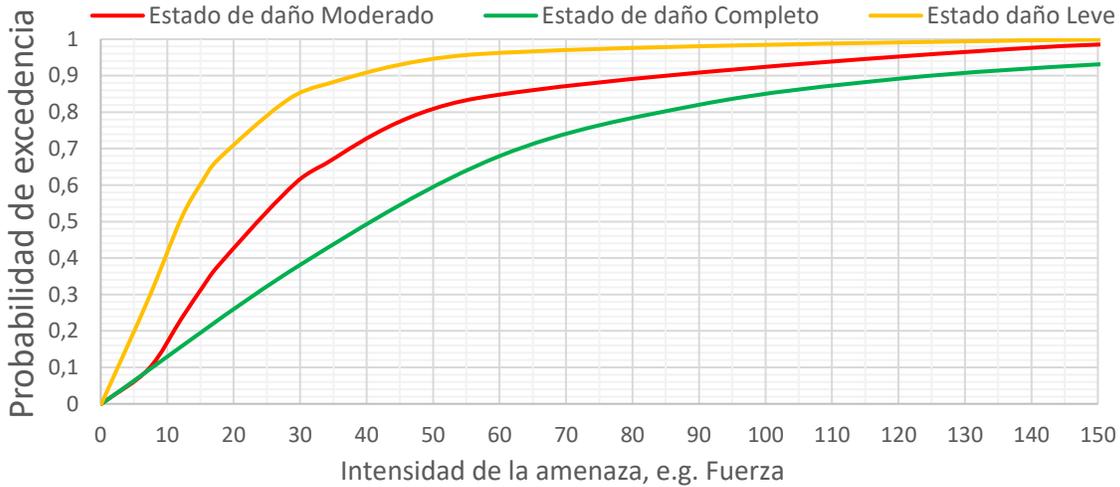


Ilustración 1. Funciones de fragilidad Relación Intensidad Daño (probabilidad)

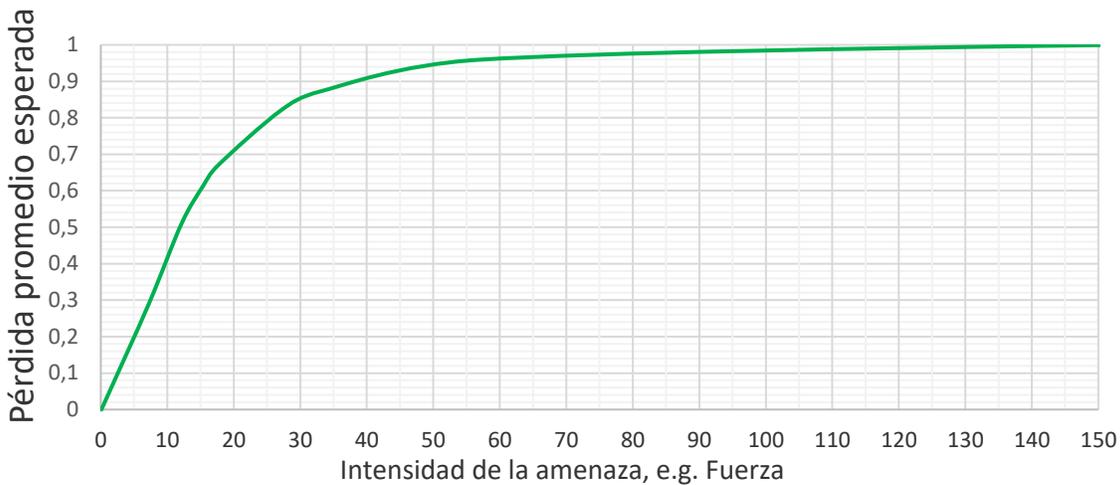


Ilustración 2. Funciones de vulnerabilidad. Relación Intensidad-Pérdida. Nótese que la pérdida promedio esperada está expresada como una fracción del valor nuevo o valor de reposición de un bien.

Debe mencionarse también que las funciones de fragilidad tienen ventajas importantes sobre las funciones de vulnerabilidad, por ejemplo: La estimación de las consecuencias de una afectación a un sistema tecnológico está asociada a la posible afectación (nivel de

daño) en cualquiera de los componentes de dicho sistema, y no solamente al nivel de intensidad del fenómeno amenazante. Adicionalmente, y por definición, las funciones de fragilidad suministran una medida de la incertidumbre asociada con el modelo de resistencia de una amenaza natural y una componente de o un sistema tecnológico. Finalmente, la obtención de la probabilidad de daño expresada en una función de fragilidad permite agregar las probabilidades de daño de diversos tipos de amenazas tanto naturales, como de otra índole que se desearan incluir en un modelo de riesgo, suministrando así las bases matemáticas para realizar análisis de riesgo ligados a multi-amenazas.

En una sección posterior se presentan distintas medidas de intensidades de fenómenos geológicos amenazantes, como inundaciones, avenidas torrenciales y fenómenos de movimientos en masa.

Por otra parte, es importante añadir que un riesgo tecnológico dado, como un escape de sustancias tóxicas, con su potencial de afectación, depende de la ocurrencia de una serie de eventos posibles y encadenados, por ejemplo:

Ocurrencia de una lluvia, ocurrencia de un deslizamiento caracterizado por un parámetro de intensidad dado, afectación a una edificación que contiene un equipo crítico (que incluye sustancias tóxicas) debido a la intensidad ocurrida, daño de la edificación al mencionado equipo, y finalmente la liberación de la sustancia tóxica. Matemáticamente, eso se expresa en términos del producto de probabilidades condicionadas (regla de la cadena), así:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{liberación de sustancia tóxica}) &= \mathbb{P}(\text{liberación } \mathbf{dado} \text{ un nivel de daño en un equipo}) * \\ &\quad \mathbb{P}(\text{daño de un equipo } \mathbf{dado} \text{ un daño en una edificación que lo contiene}) * \\ &\quad \mathbb{P}(\text{daño de una edificación } \mathbf{dado} \text{ un nivel de intensidad de la amenaza geológica}) * \\ &\quad \mathbb{P}(\text{intensidad de la amenaza } \mathbf{dada} \text{ la ocurrencia de un nivel de lluvia}) * \dots \text{ etc.} \end{aligned}$$

El número y tipo de interacciones expresados en la ecuación anterior, depende del problema particular y del modelo que se desee seleccionar. Pueden escogerse diferentes modelos con diversos tipos de complejidad, y diversos factores en la ecuación de arriba, pero las relaciones causa-efecto consideradas y el número de factores deben aparecer explícitamente en el modelo considerado.

4. AMENAZAS Y PARÁMETROS DE INTENSIDAD- REVISIÓN DOCUMENTAL

4.1 AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES

Cuando un evento de origen natural se materializa, puede transformarse en un desastre natural, interrumpiendo el funcionamiento de la sociedad, generando pérdidas humanas, económicas y ambientales. Durante un desastre natural, pueden ocurrir desastres secundarios como pérdidas de contención de material peligroso, consecuencia del impacto del evento natural sobre: instalaciones industriales, áreas de almacenamiento de sustancias químicas o cualquier infraestructura que albergue materiales peligrosos, eventos que son denominados como Natech (Natural Hazard Triggering Technological accidents) (Villalba, 2017).

Dentro de las afectaciones producto de un evento Natech, se pueden encontrar: afectaciones sociales, como daño a viviendas familiares, pérdidas económicas, debido a los daños a propiedad ajena y los costos de remediación, así como afectaciones ambientales, que involucran ecosistemas, cuerpos de agua, entre otros (Villalba, 2017). Villalba, 2017, indica que en el análisis de los eventos Natech por inundación, el evento iniciador es el impacto frontal de la inundación sobre un tanque de almacenamiento (por ejemplo), y por ello, se selecciona en general la altura y la velocidad de la inundación como los parámetros que permitirán caracterizar los impactos que pueden generar las inundaciones.

Por otra parte, un parámetro de importancia al definir un evento natural que puede incurrir en la generación de un evento Natech por inundación o avenida torrencial corresponde a la frecuencia u ocurrencia del fenómeno natural y que corresponde al periodo de retorno. En general, se ha definido como periodo de retorno para el análisis de eventos por crecientes (inundaciones o avenidas torrenciales) el asociado a 100 años, el cual corresponde a una probabilidad de ocurrencia del 1% de que el evento se presente en un periodo de tiempo (la probabilidad de ocurrencia es igual al inverso del periodo de retorno).

Para el análisis de los eventos Natech asociados a flujos de escombros o avenidas torrenciales, Prieto, et al., 2018, plantea un procedimiento metodológico para desarrollar funciones que relacionan la intensidad del peligro con la probabilidad de daño estructural (funciones de fragilidad, en lugar de funciones de vulnerabilidad, basadas en las fuerzas hidrodinámicas combinadas de un evento de flujo de escombros (nivel de peligro) y la resistencia estructural inherente). En cuanto a la caracterización del componente natural, el nivel de peligro incluye una variable de fuerza hidrodinámica (FDF), que tiene en cuenta los efectos combinados de la profundidad y la velocidad del flujo de escombros, es decir, el flujo de momento (hv^2), la densidad del material (ρ) y las características de flujo

relacionadas, incluida la resistencia (Cd) y el coeficiente de impacto (Kd) (Prieto, et al., 2018).

4.2 PARÁMETROS DE INTENSIDAD PARA LA AMENAZA POR INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES

Teniendo en consideración el estado del arte en el análisis de los eventos Natech relacionados con inundaciones y avenidas torrenciales, se tienen una serie de parámetros de relevancia que permiten determinar la intensidad del peligro generada por el evento natural, tal como lo ha desarrollado Villalba, 2017 y Prieto, et al., 2018. En el presente capítulo, se retoma dicha información como base metodológica para adelantar el análisis de los eventos Natech al interior de la región del Valle de Aburrá, donde se aborda especialmente la información relacionada con los eventos de inundación y avenidas torrenciales.

De acuerdo a Prieto, et al., 2018, los componentes del modelo de fragilidad del flujo de escombros (incluyendo eventos de inundación) que representan la demanda estructural general (fuerza lateral) en términos de flujo de momento (hv^2), densidad de flujo de escombros (ρ), resistencia (Cd) y potencial de fuerza de impacto (Kd).

4.2.1 Flujo de momento (hv^2)

Flujo de momento, se utiliza cada vez más como un parámetro de intensidad de peligro para el modelado de tsunamis, ya que refleja los efectos combinados de la profundidad del agua y la velocidad del flujo (Park y Cox, 2016; FEMA, 2017), mencionado por Prieto, et al., 2018). Se define matemáticamente como el producto de la profundidad del agua y el cuadrado de la velocidad máxima de flujo en un punto dado (hv^2), y es una aproximación real a las fuerzas hidrodinámicas que resultan en un desplazamiento lateral hacia los edificios y otros activos de interés. El concepto de flujo de momento es igualmente aplicable para evaluar la intensidad de los peligros del flujo de escombros o de inundación (Prieto, et al., 2018).

4.2.2 Densidad de flujo de escombros (ρ)

La densidad del material de flujo de escombros o de masa de agua (ρ) en el evento natural, se considera un valor variable representado por una función de distribución log normal con un valor medio de 2000 kg/m^3 (Iverson y Denlinger, 2001; Denlinger e Iverson, 2001; Iverson, 2005, mencionados por Prieto, et al., 2018). Iverson (1997) menciona que la densidad de la mezcla suele estar entre 1800 kg/m^3 y 2400 kg/m^3 .

4.2.3 Coeficiente de arrastre (C_d)

Prieto, et al., 2018, también plantea utilizar un coeficiente de arrastre (C_d) en el modelo para representar el efecto de arrastre entre el flujo de escombros o de inundación y la estructura. Está vinculado al número de Reynolds y la geometría de la estructura, y variable en el rango entre 1 y 2.1, con un valor medio de 2.0 (Shames, 1992; FEMA, 2008; Cadavid 2017, comunicación personal, indicado en Prieto, et al., 2018). Considerando que el 95% de los valores están dentro de estos dos límites, y usando una distribución log normal, la desviación estándar del coeficiente de arrastre, $\sigma_{\ln}(C_d)$ se estima en 0.37.

4.2.4 Coeficiente de fuerza de impacto de escombros (K_d)

El coeficiente de impacto, K_d , representa las fuerzas laterales causadas por la presencia de material arrastrado dentro de un flujo de escombros con el potencial de causar daños en la construcción (partículas de tamaño grueso, grandes rocas, etc.) (Prieto, et al., 2018). Se considera que los valores de K_d tienen un valor medio de 1.2, con valores tan altos como 2.0 y tan bajos como 0.7. Suponiendo que el 95% de los valores están incluidos dentro del rango mencionado, se obtiene una desviación estándar log normal, $\sigma_{\ln}(K_d)$, de 0.52 (Prieto, et al., 2018).

4.3 AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El término movimiento en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1976 en Proyecto multinacional andino: geociencias para las comunidades andinas, 2007).

En la publicación Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia, del Servicio Geológico Colombiano (SGC), Montero Olarte (2017), acerca de los deslizamientos señala: *Hutchinson (1968) define los deslizamientos como movimientos relativamente rápidos pendiente abajo de suelo o roca a lo largo de una o más superficies discretas que delimitan la masa movilizada en el proceso. Considera que los deslizamientos comprenden una etapa inicial de falla, seguida de un recorrido, y que un problema central en la clasificación es qué peso darle a cada una de estas dos etapas, a menudo contrastantes. Aquí, Hutchinson incluye aquellos movimientos en los cuales la geometría de la superficie de falla es identificable y el recorrido moderado.*

Señala este autor además, que debido a que los materiales (suelos y rocas) son predominantemente friccionantes y que en profundidad su resistencia tiende a incrementarse en proporción a la presión efectiva de la sobrecarga, por lo anterior, se concluye que “el desarrollo de deslizamientos con superficies de falla profundas es poco

frecuente, salvo el caso de algunos deslizamientos rotacionales y compuestos ... y la mayoría de los deslizamientos son relativamente superficiales y traslacionales por naturaleza”.

En la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa versión 2016 del SGC, se definen cuatro zonas o escenarios (ver Ilustración 3), de acuerdo con su posición relativa con respecto al área afectada por el evento (exposición) (Tabla 1).

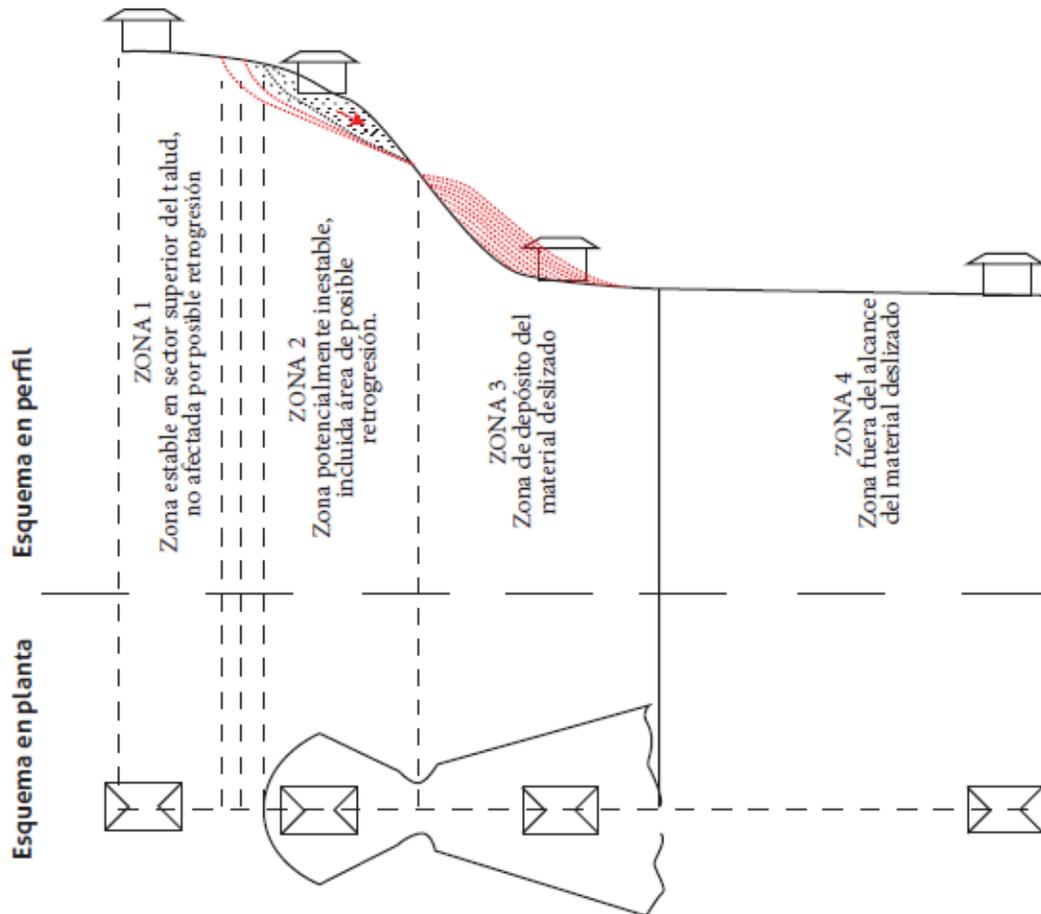


Ilustración 3. Zonas de exposición de los elementos ante un deslizamiento, tomado de Guía metodológica SGC versión 24-05-2016

De acuerdo a la ilustración anterior, las zonas 1 y 4 son zonas seguras, por estabilidad y por estar fuera del alcance del material deslizado.

Tabla 1. Zonas o escenarios de exposición, tomado de guía metodológica SGC

Zona	Descripción	Daños esperados	Criterio de Intensidad o magnitud
1	Elementos ubicados sobre la zona estable en la parte superior del talud, sin posibilidad de afectación por retrogresión.	No se esperan daños a causa de los movimientos en masa.	
2	Elementos ubicados sobre una ladera potencialmente inestable o potencialmente afectados por efectos de retrogresión.	Colapso o daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona de retrogresión. Asentamientos diferenciales, inclinaciones y agrietamientos asociados con movimientos lentos; colapso de la estructura asociado con movimientos rápidos.	Velocidad del movimiento Actividad del deslizamiento Cantidad de desplazamiento Desplazamientos verticales
3	Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa o en la zona de depósito del material deslizado.	Daños localizados por impacto, colapso total, obstrucción, enterramiento, entre otros.	Velocidad del movimiento Distancia de viaje Presiones laterales Impactos (volúmenes y energía cinética) Alturas de acumulación de material
4	Elementos fuera del alcance del movimiento en masa y su área de depósito.	No se esperan daños debidos a los movimientos en masa.	

Intensidad del deslizamiento:

En la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa versión 2016 del SGC, para estimar la intensidad de los eventos de amenaza por movimientos en masa, y de acuerdo a las zonas o escenarios definidos, se consideran tres escenarios de deformación del terreno: un escenario de deslizamientos de baja deformación (movimientos lentos), un escenario de deslizamientos en etapa de falla (movimientos rápidos) y un escenario de caída de rocas.

4.3.1 Etapa de deformación lenta

Tomando como referencia Du et al. (2013), se presentan dos etapas, una de deformación lenta, en la cual se presentan grietas e inclinaciones a las estructuras localizadas en la zona del deslizamiento, debido al desplazamiento y velocidad de la masa deslizada y a la fundación de la edificación.

Los parámetros de intensidad para este caso incluyen: Velocidad del deslizamiento y Deformación local (grado de severidad) y la profundidad de deslizamiento (dimensiones espaciales).

$$I_{def} = 1 - (1 - I_{d-def})(1 - I_{d-vel})(1 - I_{d-dep}) \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde I_{d-def} , I_{d-vel} e I_{d-dep} son los parámetros de deformación, velocidad y profundidad del deslizamiento en el sitio de la implantación de la estructura.

Tabla 2. Valor de intensidad por deformación, tomado de Du et al. (2013)

Relación deformación/ umbral tolerable	I_{d-def}
<0.2	0.1
0.2-0.4	0.2
0.4-0.6	0.4
0.6-0.8	0.6
0.8-1.0	0.8
1.0-1.2	0.9
≥ 1.2	1.0

De acuerdo con el movimiento del deslizamiento y la respuesta de las estructuras, la intensidad de la velocidad del movimiento puede obtenerse por el siguiente modelo (Li 2010), en dónde v es la velocidad en mm/s.

$$\text{Para } v \leq 5 \times 10^{-7} \quad I_{d-vel} = 0$$

$$\text{Para } 5 \times 10^{-7} < v < 5 \times 10^{-1} \quad I_{d-vel} = \frac{1}{36} (\log_{10} v + 6.3)^2$$

$$\text{Para } v \geq 5 \times 10^{-1} \quad I_{d-vel} = 1$$

Para estructuras en la zona de la ladera inestable, el grado de daño depende principalmente de la profundidad relativa de la fundación de la estructura respecto a la superficie de deslizamiento. Ragozin (2000) cuantifica la vulnerabilidad de las estructuras como una función de la profundidad de la cimentación h (m) y de la profundidad del deslizamiento d (m):

$$\text{Para } d/h < 0.8 \quad I_{d-dep} = \left(1.25 \cdot \frac{d}{h}\right)^{1/3}$$

$$\text{Para } 0.8 < d/h \leq 1.2 \quad I_{d-dep} = 1$$

$$\text{Para } d/h > 1.2 \quad I_{d-dep} = 1.44 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{-2}$$

Los valores de los parámetros requeridos para analizar la intensidad del deslizamiento en esta etapa, deben estimarse primordialmente con estudios de detalle, sin embargo, es posible utilizar algunas correlaciones que pueden encontrarse en la literatura, que se consideren válidos y con un fundamento teórico adecuado.

4.3.2 Etapa de falla

En esta etapa, las estructuras localizadas en la zona del deslizamiento, son completamente destruidas (vulnerabilidad 1.0). Para las estructuras localizadas en la zona de run-out (zona 3) los mecanismos de impacto pueden ser divididos en 2 categorías: enterramiento y presión de impacto.

Para las estructuras, la intensidad de deslizamiento se define como función de la profundidad y de la presión de impacto:

$$I_{fai-s} = 1 - (1 - I_{pre})(1 - I_{f-dep}) \quad \text{Ec. (2)}$$

I_{pre} e I_{f-dep} son los parámetros de presión de impacto y profundidad de deslizamiento en el sitio de la implantación de la estructura

- **Presión de impacto:**

La presión de impacto horizontal es la principal causa de daño en las estructuras (Glade 2004, Ulusay 2007, en Du et al. (2013)).

El modelo de vulnerabilidad propuesto utiliza el valor promedio de cada tipología para estimar el límite de presión horizontal P vs el número de pisos n , en el cual los

valores del coeficiente α y β para cada tipo de estructura se enumeran en la siguiente tabla:

$$P = \alpha \ln(n) + \beta \quad \text{Ec. (3)}$$

Tabla 3. Coeficientes α and β en Eq. 7 para diferentes tipos de estructuras, tomado de Du et al. (2013) (2013)

Structure	Strongly aseismic	Weakly aseismic	Strongly non-aseismic	Weakly non-aseismic
Regular structure				
A	-4.384	-2.717	-2.157	-1.276
B	19.125	13.164	10.568	7.693
Irregular structure				
A	-3.779	-2.467	-1.821	-1.343
B	14.553	10.288	8.068	6.066

Otra alternativa para estimar la presión de impacto es utilizar la ecuación (en Du et al. (2014)):

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde

P es la presión de impacto en kPa ,

ρ es la densidad de la masa movida en kg/m^3

v es la velocidad en m/s .

La relación entre la presión de impacto de los deslizamientos de tierra en el edificio y el límite de presión horizontal se define como el parámetro de intensidad I_{pre} (Tabla 4).

Tabla 4. Valores del parámetro de intensidad de presión de impacto, presión de impacto/presión límite horizontal de la estructura (tomado de Du et al. (2013))

Relación Presión de impacto de deslizamiento/ Presión horizontal límite de estructura	I_{pre}
<0.1	0.05
0.1-0.2	0.20
0.2-0.4	0.40
0.4-0.7	0.70
0.7-1.0	0.90

Relación Presión de impacto de deslizamiento/ Presión horizontal límite de estructura	I_{pre}
≥ 1.0	1.00

Tabla 5. Presión de falla según tipología de estructura (tomado de Du et al. (2013))

Tipología	Presión límite de la estructura (kPa)
F Construcciones simples	1
E Estructuras ligeras	5
D Estructuras con confinamiento deficiente	8
C Mampostería reforzada	11
B Edificaciones reforzadas	18
A Edificaciones con reforzamiento especial	20

De acuerdo con Prieto, et. al, 2018, otro parámetro muy importante para estimar la intensidad del impacto horizontal es el flujo de momento, también utilizado como un parámetro de intensidad de peligro para el modelado de tsunamis, ya que refleja los efectos combinados de la profundidad del agua y la velocidad del flujo (Park y Cox, 2016; FEMA, 2017). Se define este como el producto de la profundidad de la masa de suelo desplazada y el cuadrado de la velocidad máxima de flujo en un punto dado (hv^2), y es una aproximación realista de las fuerzas hidrodinámicas que resultan en un desplazamiento lateral hacia los edificios y otros elementos de interés.

- Profundidad del deslizamiento de tierra:** El parámetro de intensidad para la profundidad del deslizamiento de tierra debe definirse como la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la estructura. Cuando la profundidad del deslizamiento es igual o mayor que la estructura, la estructura pierde por completo su funcionalidad. Los valores propuestos de I_{f-dep} se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura, tomado de Du et al. (2013)

Relación Profundidad del deslizamiento/ altura edificación	I_{f-dep}
<0.2	0.10
0.2-0.4	0.30
0.4-0.6	0.50
0.6-0.8	0.70

Relación Profundidad del deslizamiento/ altura edificación	I_{f-esp}
0.8-1.0	0.90
≥ 1.0	1.00

4.4 PARÁMETROS DE INTENSIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA

Los valores de los parámetros necesarios para evaluar la intensidad, idealmente deben obtenerse de estudios de detalle, que permitan obtener un modelo geológico-geotécnico, para lo cual se requiere un levantamiento topográfico detallado, una campaña de exploración del subsuelo y la ejecución de ensayos de laboratorio que permitan caracterizar los materiales detectados, no sólo en superficie sino en profundidad.

Para los estudios de detalle, se hace necesario definir al menos una sección que represente la zona a evaluar, sin embargo, de ser necesario y de acuerdo al análisis particular de cada zona, deben evaluarse más secciones de tal forma que se tenga un análisis completo de toda la zona.

Para cada sección evaluada, se deben localizar al menos 3 sondeos que permitan identificar el perfil geotécnico, los espesores de los materiales y las potenciales zonas de falla. Los sondeos ejecutados, deberán sobrepasar las potenciales zonas de falla (mínimo 3 metros por debajo de estas) o profundizar la roca por lo menos 2 m, utilizando equipos con la capacidad de generar una recuperación adecuada y permitan sobrepasar materiales que de acuerdo al ensayo SPT (Standard Penetration Test) presenten rechazo. Cuando a criterio del geotecnista se requiera realizar exploración geofísica, se podrá suprimir uno de los sondeos, siempre y cuando sea posible inferir el perfil del subsuelo en forma adecuada.

Los equipos para exploración y de ensayos *in situ* deben responder a la naturaleza de los materiales y su condición en el sitio, dentro de los que se encuentran principalmente los suelos blandos y aquellos que presentan condiciones especiales, como los descritos en el capítulo H.9 de la NSR-10, buscando siempre caracterizar adecuadamente todos los materiales conforme a lo dispuesto en la norma mencionada o cualquiera que la modifique.

Cuando en la ejecución de los sondeos se obtengan núcleos de roca, se deben obtener muestras de tipo núcleo, llevando, además, un registro detallado y continuo de los porcentajes de recuperación, seguido de un levantamiento detallado de la disposición de las unidades litológicas y de las discontinuidades, realizado por un geólogo.

En todos los sondeos, y durante la permanencia en la campaña de exploración, se debe determinar diariamente (y al menos 2 veces al día), y con el mayor detalle posible la posición del nivel de agua en las perforaciones, con el fin de tener claridad en su variación en los análisis de estabilidad. En caso de no detectar este nivel de agua, debe señalarse

claramente en el registro de perforación y en los informes de estabilidad. Por criterio del geotecnista y en aquellos casos que se considere requieran seguimiento, se recomienda la instalación de piezómetros para monitorear los niveles del agua y sus variaciones con las condiciones meteorológicas.

Los métodos de exploración deben ajustarse a las siguientes normas:

- INV E-101-07 (Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería).
- INV E-105-07 (Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada).

Ensayos de laboratorio

En los sondeos realizados deben obtenerse muestras alteradas e inalteradas con el fin de caracterizar los diferentes estratos detectados en la exploración, las cuales además de ser descritas por un profesional en geología, deberán seleccionarse y remitirse un porcentaje representativo de las mismas al laboratorio de suelos con el fin de caracterizar de manera cuantitativa las diferentes propiedades de los diferentes materiales encontrados.

Los tipos de ensayos y la cantidad sugerida se indican en la siguiente tabla como porcentaje del número total de muestras.

Tabla 7 Ensayos que se recomienda realizar sobre las muestras obtenidas

Tipo de ensayo	Muestras (%)	Norma	Norma ASTM
Humedad natural	70 - 90	NTC-1495-01	ASTM D2216-11
Límites	30 - 50	NTC-4630-99	ASTM D4318-11
Granulometría	30 - 50	NTC-152299	ASTM D2487-11
Hidrometría	20	INV E-124-07	ASTM D2487-11
Peso unitario	30 - 60	INV E-217-07	ASTM D4254-11
Peso específico	10	INV E-223-07	ASTM D4254-11
Compresión simple	12	NTC-1527-00	
Corte directo	10 - 20	NTC-1917-00	ASTM D3080-11
Triaxial	5	INV E-153-07	ASTM D4829-11
Triaxial cíclico	2	INV E-153-07	ASTM D3999-11
Consolidación	5	NTC-1967-00	ASTM D2435-11
Expansión	3	INV E-132-07	ASTM D5311-13
Compresión roca	3		ASTM D7012-13

Modelo geológico-geotécnico

Con base en la determinación de la estratigrafía para cada perfil sección representativa seleccionada, se deben plasmar las condiciones geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada una de las secciones, incluyendo en la misma, los parámetros

definidos mediante los resultados de laboratorio y ensayos de campo, al igual que las condiciones de nivel freático.

Evaluación de la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad en suelo se debe realizar un análisis de estabilidad por equilibrio límite y en caso de requerirse de elementos finitos, mientras que, para las unidades de roca o macizo rocoso se debe hacer un análisis de posibilidad cinemática de movimiento.

Para evaluar la estabilidad de cada sector se deben considerar tres situaciones: caso estático, análisis bajo consideraciones normales y extremas de lluvia y análisis bajo sollicitaciones sísmicas.

Del análisis geotécnico realizado, se deben obtener los valores de los diferentes parámetros requeridos para evaluar la intensidad como son:

- Parámetros Geomecánicos de los materiales (cohesión, ángulo de fricción y peso unitario del material).

- Altura del talud.

- Pendiente del talud.

- Profundidad de la superficie de falla

- Análisis de deformaciones

Con los parámetros anteriores, se debe estimar la intensidad del movimiento siguiendo el procedimiento aquí descrito.

En caso de no contarse con información de detalle, es posible utilizar algunas correlaciones encontradas en la literatura, con el fin de estimar estos parámetros de intensidad, sin embargo, siempre que sea posible debe realizarse el análisis de detalle recomendado en este título.

4.4.1 Velocidad del movimiento (m/s):

Para las zonas 2 y 3, se debe estimar la velocidad del movimiento, con el fin de estimar este parámetro en la etapa de deformación lenta y etapa de falla, a continuación, se presenta la metodología sugerida por la guía metodológica del SGC para estimar esta velocidad, dependiendo de la zona analizada:

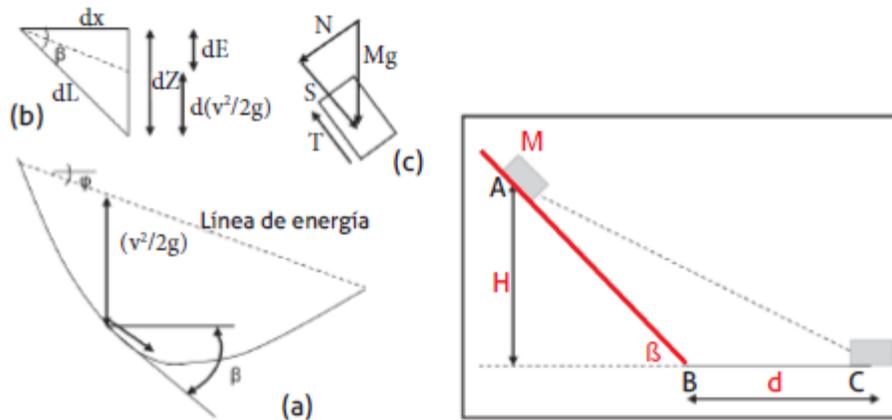


Ilustración 4. Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema. Fuente: Guía Metodológica 2016 (SGC).

Teniendo que el tramo AB corresponde a la zona 1 y el tramo BC a la zona 2 (zona de run out).

Así, la velocidad desarrollada por la masa deslizante mientras baja por el tramo A-B se expresa como:

$$V_{AB} = \sqrt{2Hg \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Bajo la hipótesis de que no hay pérdida de energía a causa del impacto en el punto B, debido al cambio de pendiente, cambiando la dirección de la velocidad, la distancia de viaje d y el ángulo de viaje desde A hasta C están dados por las expresiones

$$d = \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right) \frac{H}{\tan\phi_p} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\tan\alpha = \frac{\tan\beta \tan\phi_p}{\tan\beta + \tan\phi_p - \tan\phi}$$

Finalmente, la velocidad en el tramo B-C (zona 3) puede determinarse de acuerdo con la ecuación

$$v_{BC}^2 = v_B^2 - 2g \tan\phi_p d \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde

- M es la masa deslizada y g la aceleración de la gravedad.

- β es la inclinación del terreno.
- ϕ es el ángulo de fricción interna en el talud (A-B)
- ϕ_p es el ángulo de fricción interna en la zona plana (B-C).
- $a(t)$ es la aceleración desarrollada por la masa.

Considerando que la pendiente de la línea de energía representa de una mejor manera el inicio del movimiento de la masa de suelo, es posible, a criterio del geotecnista, aplicar el principio de esfuerzo efectivo en el cual se obtiene el ángulo de fricción modificado ϕ_b de la siguiente expresión: $\tan \phi_b = (1 - r_u) \tan \phi$. Donde r_u es el coeficiente de presión de poros usado en la mecánica de suelos, que es la relación entre la presión de poros y el esfuerzo vertical total (Körner, 1976).

- Se propone utilizar como $\tan \phi_b$ la relación L/H tomada de la Ilustración 5 de acuerdo a Iverson 1997, dado que L a su vez define la distancia de viaje, en los casos en que no se cuente con esta información, es posible utilizar como referencia los datos presentados en la Tabla 1 de acuerdo al origen del movimiento en masa, para nuestro caso se estima que valores de L/H entre 2 y 9 pueden representar los posibles eventos a evaluar, el valor finalmente seleccionado deberá ser coherente con el valor de r_u (coeficiente de presión de poros) estimado para el periodo de retorno a evaluar.

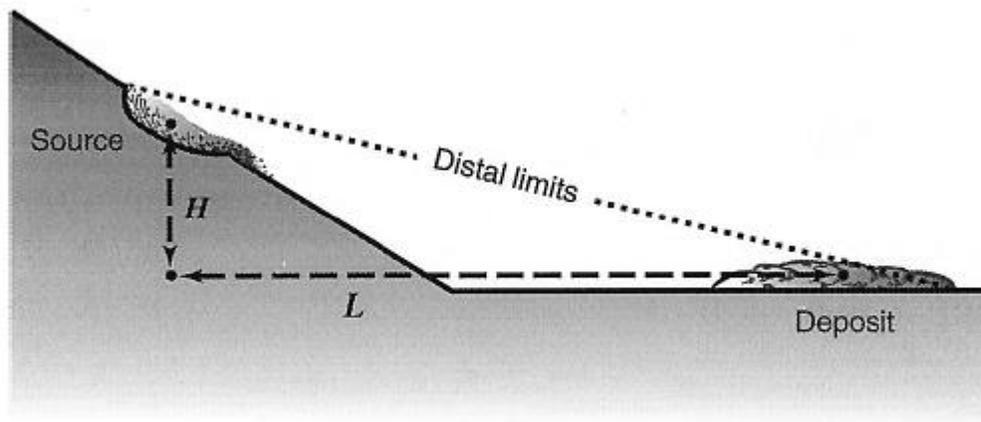


Ilustración 5. Definición de las variables H y L para la estimación de la velocidad de caída, tomado de Iverson, 1997.

Tabla 8. Valores estimados de la relación L/H, tomado de Iverson 1997

Flow Location	Date	Reference	Flow Volume, m ³	L, m	H, m	L/H	Origin
Mount Rainier, Osceola mudflow	circa 5700 B.P.	Vallance and Scott [1997]	~10 ⁹	120,000	4,800	25	landslide and downstream erosion
Nevados Huascarán, Peru	May 31, 1970	Plafker and Ericksen [1978]	~10 ⁸	120,000	6,000	20	landslide
Nevado del Ruiz, Colombia, Río Guali	Nov. 13, 1985	Pierson et al. [1990]	~10 ⁷	103,000	5,190	20	pyroclasts melting snow
Mount St. Helens, South Fork Toutle	May 18, 1980	Fairchild and Wigmosta [1983]	~10 ⁷	44,000	2,350	19	wet pyroclastic surge
Mount St. Helens, Muddy River	May 18, 1980	Pierson [1985]	~10 ⁷	31,000	2,150	14	wet pyroclastic surge
Wrightwood, Calif., Heath Canyon	May 7, 1941	Sharp and Nobles [1953]	~10 ⁶	24,140	1,524	16	landslide
Three Sisters, Oreg., Separation Creek	1933	J. E. O'Connor et al. (manuscript in preparation, 1997)	~10 ⁶	6,000	700	9	glacier breakout flood
Mount Thomas, NZ, Bullock Creek	April 1978	Pierson [1980]	~10 ⁵	3,500	600	6	landslide
Wrightwood, Calif., Heath Canyon	May 1969	Morton and Campbell [1974]	~10 ⁵	2,700	680	4	landslide
Santa Cruz, Calif., Whitehouse Creek	Jan. 4, 1982	Wieczorek et al. [1988]	~10 ⁵	600	200	3	landslide
Pacífica, Calif., Oddstad site	Jan. 4, 1982	Howard et al. [1988]	~10 ³	190	88	2	landslide
USGS debris flow flume	Sept. 25, 1992	Iverson and LaHusen [1993]	~10 ¹	78	41	2	artificial release from flume gate

Most data are for flows that were observed during motion or within hours of deposition. With the exception of the Osceola mudflow, all flows apparently maintained a relatively constant mass (within a factor of 2) from initiation to deposition. The Osceola is included in the tabulation because it is the largest well-documented debris flow in the terrestrial geologic record.

De acuerdo a Román, D., y Chio, G. (2018), para estimar la velocidad del movimiento es posible utilizar otro modelo de deslizamiento que considera los efectos de la superposición de la fricción de Coulomb y un nuevo término denominado ‘fricción-turbulenta’. Dicho modelo es el llamado *modelo biparamétrico*. La fricción o la resistencia debida a la turbulencia se produce gracias a que los escombros en el flujo chocan entre sí y dan paso a un movimiento aparentemente aleatorio entre partículas, no obstante, existe una cantidad de movimiento uniforme y un flujo común de toda la masa (Heim, 1932). Tal tipo de movimiento involucra una mezcla entre sólidos y aire (en ocasiones líquidos también), y es llamado ‘turbulencia’, cuyo requisito único para existir es que haya libertad de movimiento entre las partículas involucradas (Hungry et al., 2005; Körner, 1976; Voellmy, 1955).

Las expresiones y demás consideraciones para estimar las velocidades con este modelo pueden ser consultadas en Román, D., y Chio, G. (2018).

4.4.2 Deformación local

Tomando como referencia Du et al. (2013), las deformaciones incluyen asentamiento, movimiento horizontal e inclinación (Bell 1978, Peng 1992; Zheng 2007). En este mismo artículo, presentan una relación que de acuerdo con su criterio parece proporcionar una buena aproximación de esta deformación:

$$W_s = a W_g + b \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde W_s y W_g son las deformaciones de la estructura y el suelo, a es la pendiente y b es la intersección. La muestra el rango de a y b frente a los tipos de movimiento y estructura (Peng 1992; Zheng 2007).

Tabla 9. a y b en función de la deformación del terreno y el tipo de estructura

Estructura	Mampostería, Estructuras en concreto		Estructuras en Concreto Reforzado	
	a	b	a	b
Asentamiento (mm)	0.87-0.99	0.50-1.27	0.96-1.03	1.19-3.57
Tensión (mm/m)	0.74-0.89	—	0.68-0.71	—
Compresión (mm/m)	0.28-0.32	—	0.24-0.27	—
Inclinación (mm/m)	0.99-1.06	0.80-0.90	0.69-0.97	0.03-0.2

Chen, et al (2011), presenta en su artículo la información sobre una investigación desarrollada en China por el departamento de la Industria del Carbón, quien publicó una regulación para el grado de daño de los edificios con estructura de mampostería y hormigón (China Coal Industry Bureau 2000).

Tabla 10. Relación entre el daño a la construcción y la deformación de la superficie del terreno – Tomado de Chen, et al (2011)

Tipo de deformación	Relación	Parámetros
VD	$W_s = a_1 W_g + b_1$	W : hundimiento, mm; a_1 : coeficiente; b_1 : constante, que está relacionado con la rigidez del edificio y el entorno geológico circundante. Cuando a_1 se acerca a 1.0, el hundimiento del edificio y la superficie es el mismo.
TD	$i b = a_2 i_s + b_2$	i : volumen de inclinación, mm/m; a_2 : coeficiente, 0.665~1.07; b_2 : constante
HD	$\epsilon b = a_3 \epsilon_s + b_3$	ϵ desplazamiento, mm/m; a_3 : coeficiente; b_3 : constante. Cuando la deformación es extensión, a_3 varía de 0.71 a 0.84 para construcciones no reforzadas, y es 0.17 para construcciones reforzadas. Cuando la deformación es compresión, a_3 varía de 0.24 a 0.57 para construcciones no reforzadas, y es 0.01 para construcciones reforzadas.

VD-deformación vertical; TD- deformación de inclinación; HD-deformación horizontal

4.4.3 Profundidad de deslizamiento

Para este parámetro, se presentan a continuación dos correlaciones que nos suministran información para poder estimar con algún criterio dicha profundidad:

Jibson (2000) propone un modelo de equilibrio límite de talud infinito en material friccionante y cohesivo para obtener el factor de seguridad mediante la siguiente relación:

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin \theta} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \theta} - \frac{m \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma \tan \theta} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde c' es la cohesión efectiva, φ' es el ángulo de fricción efectiva, γ es el peso unitario de los materiales, θ es el ángulo de la pendiente, t es el espesor del suelo normal a la pendiente, γ_w es el peso unitario del agua y m es la proporción del suelo que está saturado.

En la ecuación presentada por Jibson, es posible asumir un FS que indique falla inminente en el talud, el cual puede tomarse entre 0.9 y 1.0, además de asumir 3 escenarios de saturación (saturado, parcialmente saturado y seco), despejando el valor de t como la profundidad de deslizamiento, así obtendríamos un primer valor de este parámetro.

La anterior ecuación, como se mencionó, se presenta bajo el modelo de talud infinito, sin embargo, dado que pueden esperarse movimientos más profundos, se presenta para este tipo de movimientos las relaciones presentadas por Skempton & Hutchinson (1969), según los cuales las fallas de tipo profundo (deslizamiento rotacional) tienen una relación D/L entre 0,15 y 0,33, donde D es la profundidad de la superficie de falla y L su longitud (Tomado de Montero Olarte - 2017), con lo cual tenemos la segunda correlación.

Al realizar el análisis de este parámetro, a criterio del geotecnista se podrá utilizar el mayor valor estimado.

4.5 SINTESIS DE PARÁMETROS DE INTENSIDAD UTILIZADOS EN FUNCIÓN DE LAS AMENAZAS

Existen diversas técnicas tanto cuantitativas como cualitativas para evaluar posibles pérdidas ante eventos naturales como los flujos de detritos. Una de las técnicas que se han desarrollado para estimar las consecuencias de los flujos de escombros (avenidas torrenciales) tanto en pérdidas humanas como en daño en estructuras es el desarrollo de curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan las pérdidas potenciales máximas con la intensidad de un evento o escenario específico. Otra técnica es el desarrollo de curvas de fragilidad que ilustran la probabilidad de exceder ciertos estados de daño. Una técnica más avanzada y completa es el análisis del riesgo de un evento específico que comprende en forma general la determinación de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad.

En esta sección se ilustra el estado del arte de los modelos y los diferentes enfoques que se han desarrollado para estimar principalmente la vulnerabilidad, modificado de (Prieto, Journeay, Acevedo, Arbelaez, & Ulmi, 2018) ver Tabla 11.

Tabla 11. Recopilación de modelos de vulnerabilidad, fragilidad, o riesgos empleados en la evaluación de los impactos y las consecuencias de los peligros del flujo de escombros.

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
(Fell & Hartford, 1997)	Altura del flujo		Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Mampostería, Italia
(Borner, 1999)	Combinaciones de profundidad y velocidad del flujo, agrupadas en 3 niveles de intensidad	Función de paso	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios genéricos, Europa
(Liu, Yue, Tham, & Lee, 2002)	Densidad espacial de barrancos de flujo de escombros, grado de meteorización de la roca, densidad de fallas activas, porcentaje de pendiente mayor a 25° del total, frecuencia de peligros de inundaciones, covarianza promedio de precipitación mensual, días promedio con precipitación ≥ 25 mm a diez años y porcentaje de tierra cultivada con pendiente superior a 25 ° del total. Valor acumulado de inversión en activos fijos a 15 años, producto interno bruto anual, valor total del recurso terrestre	Evaluación compuesta de factores múltiples para la amenaza Función de potencia para la vulnerabilidad $\text{Riesgo} = \text{amenaza} \times \text{vulnerabilidad}$	Amenaza y vulnerabilidad de 0 a 1, riesgo de muy bajo a muy alto	Infraestructura, propiedad y recursos de la tierra, China
(Liu & Lei, 2003)	Precipitación media anual, porcentaje de tierra cultivada con pendientes $> 25^\circ$, el área anual promedio de tierra	Función de potencia para la amenaza y vulnerabilidad	Amenaza y vulnerabilidad de 0 a 1, riesgo de muy bajo a muy alto	Infraestructura, propiedad y recursos de la tierra, China

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
	recuperada por año, la densidad de barrancos de flujo de detritos. Valor acumulado de inversión en activos fijos a 15 años, producto interno bruto anual, valor total del recurso terrestre	Riesgo = amenaza x vulnerabilidad		
(Liu, 2006)	Activos de los edificios, instalaciones de tráfico; obras de salvamento; propiedades personales; recursos de la tierra; la edad, educación, riqueza de los residentes; tasa de crecimiento natural de la población; densidad de población	Modelo de raíz cuadrada	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Vulnerabilidad específica del sitio, China
(Fuchs, Heiss, & Hübl, 2007)	Altura de deposición	Polinomio de segundo orden	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Genérico, mampostería y hormigón, Europa
(Haugen & Kaynia, 2008)	Suma del efecto de la presión hidrostática y el desplazamiento máximo del impacto	Funciones de sismo-fragilidad log-normal basadas en los tipos de edificios de HAZUS	Fragilidad, probabilidad de excedencia de daño.	Específico para tipo edificio, Europa
(Akbas, Blahut, & Sterlacchini, 2009)	Altura de deposición	Polinomio de segundo orden	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Genérico, mampostería y hormigón, Europa
(Calvo & Savi, 2009)	Simultáneamente velocidad y profundidad de flujo	Función bilineal bivariada	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Hormigón armado, residencial de 2 plantas, Europa
(Tsao, Hsu, Cheng, Lo, & Chen, 2010)	Profundidad de flujo	Polinomio de segundo orden	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 100	Mampostería y hormigón genérico, madera y lamina de metal, Taiwán

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
(Ding, Tellez, & Hu, 2010)	Estructura de la vivienda, la fecha de construcción, el área de la vivienda, los niveles, la población y el ingreso familiar	Mapa Auto Organizado (SOM)	Mapa de vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Vivienda con estructura simple, China
(Totschnig, Sedlacek, & Fuchs, 2011)	Altura de deposición, relación altura de deposición vs altura del edificio	Distribuciones Weibull, Frechete	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Alojamiento turístico y residencial privado genérico, Europa
(Quan Luna et al., 2011)	Profundidad de flujo, presión de impacto y viscosidad cinemática	Función logística	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Mampostería y hormigón genéricos, de 1 a 3 plantas, Europa
(Lo, Tsao, & Hsu, 2012)	Altura de deposición	Polinomio de tercer orden, acotado	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios reforzados y no reforzados, Taiwán
(M. Jakob, Stein, & Ulmi, 2012)	Flujo de velocidad de momento = profundidad del flujo x velocidad ²	Función de paso, expresada como una matriz de probabilidad de 4 filas (una fila para cada estado de daño)	Probabilidades de estar en cada uno de los cuatro estados de daño (algo de sedimentación para completar el daño)	Genérico, mampostería y hormigón, en todo el mundo base de datos
(Papathoma-Köhle, Keiler, Totschnig, & Glade, 2012)	Altura de deposición	Distribución de Weibull	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Mampostería y hormigón genérico, Europa
(Totschnig & Fuchs, 2013)	Altura de deposición, relación altura de deposición vs altura del edificio	Distribuciones log-logística, Weibull	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Alojamiento turístico y residencial privado genérico, Europa
(Cui, Zou, Xiang, & Zeng, 2013)	Energía cinética, profundidad del flujo y profundidad de la inundación	Simulación numérica del movimiento del flujo de escombros y análisis de inundaciones para determinar la amenaza. La vulnerabilidad se calcula como el producto del valor económico y el índice de susceptibilidad de los objetos afectados por	Vulnerabilidad y riesgo de bajo a alto.	Diferentes estructuras de edificios, China

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
		amenazas. Riesgo = amenaza x vulnerabilidad		
(Quan Luna et al., 2013)	Profundidad del flujo y presión de impacto	Función logística	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios de estructura de hormigón armado de dos o tres pisos con muros de mampostería de ladrillo, Italia
(Rheinberger, Romang, & Bründl, 2013)	Velocidad y profundidad de flujo	Modelo lineal doble generalizado, función exponencial	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios residenciales, industriales y agrícolas, Suiza
(Eidsvig, Papathoma-Köhle, Du, Glade, & Vangelsten, 2014)	Altura de flujo	Distribución Weibull	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1, curvas de fragilidad, probabilidad de excedencia	Edificios residenciales, Italia
(Winter et al., 2014)	Volumen del deslizamiento	Ajuste de curvas estándar, polinomio de tercer orden para estados de daño limitado y polinomio de cuarto orden para estados de daño grave y destruido	Curvas de fragilidad, probabilidad de excedencia	Vías, Escocia y Corea
(Godfrey, Ciurean, van Westen, Kingma, & Glade, 2015)	Profundidad de flujo	Promedio de las curvas de entrada. Función de interpolación no lineal	Curva de vulnerabilidad genérica, vulnerabilidad específica, grado de pérdida de 0 a 1	Concreto reforzado, madera, mampostería, Rumania
(Papathoma-Köhle, Zischg, Fuchs, Glade, & Keiler, 2015)	Altura de flujo	Distribución Weibull	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios residenciales, Italia

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
(Ding, Heiser, Hübl, & Fuchs, 2016)	Población, densidad económica y de carreteras, cobertura de edificios y tierras agrícolas, áreas afectadas por peligros, tasa de urbanización y PIB per cápita	Función raíz cuadrada Método de Contribución de la Superposición de Peso (CWS)	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Genérico, China
(Kang & Kim, 2016)	Profundidad y velocidad del flujo, presión de impacto	Sigmoidea en forma de S	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Específico para el tipo de edificio, sistema HAZUS, Corea
(J. Zhang, Guo, Wang, & Qian, 2016)	Momento, fuerza de impacto, momento flector	Función lineal	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Muros de ladrillo y hormigón, China
(Ciurean et al., 2017)	Altura del flujo de detritos	Análisis de regresión, función acumulativa triangular, distribución uniforme, función de la relación intensidad-resistencia	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificio de apartamentos, apartamento de vacaciones, casa, etc., Italia
(Prieto et al., 2018)	Flujo de momento	Función de distribución lognormal.	Funciones de fragilidad, probabilidad de superar un umbral de estado de daño específico	Edificios representativos del sistema HAZUS. Edificios de mampostería no reforzada (URM) de 1, 2 y 3 pisos, Corea del sur y Colombia
(S. Zhang, Zhang, Li, & Xu, 2018)	Profundidad del flujo, presión de impacto, velocidad de flujo	Análisis de regresión no lineal, función de forma parabólica	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Estructuras de ladrillo y hormigón y estructuras de armazón de hormigón armado, China

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
(Ouyang, Wang, An, Liu, & Wang, 2019)	Profundidad máxima del flujo con el momento	Métodos de reserva de material de origen, inundación por lluvia y continuo integrado en profundidad para la amenaza. La vulnerabilidad se calcula como el producto del índice económico y el índice de grado de daño. Riesgo = amenaza x vulnerabilidad	Amenaza de baja a alta, vulnerabilidad de 0 a 1, riesgo de bajo a alto	Genérico, China
(Kean et al., 2019)	Profundidad del flujo, flujo de momento	Función de distribución lognormal.	Funciones de fragilidad, probabilidad de superar un umbral de estado de daño específico	Sistema HAZUS, Estados Unidos
(Liang & Xiong, 2019)	Flujo de momento, intensidad del flujo	Modelo de elementos finitos, función exponencial	Vulnerabilidad de 0 a 1, funciones de fragilidad, probabilidad de superar un umbral de estado de daño específico	Puentes, China
(Ding & Huang, 2019)	tamaño de la familia, edad de la estructura, la condición física de sus miembros, las características étnicas, educación y la distancia a los eventos de flujo de escombros conocido	Enfoque de mapa autoorganizado (SOM)	Vulnerabilidad de 0 a 1	Genérico, China
(Azmeri & Isa, 2018)	Profundidad del flujo	Distribución polinomial de orden dos y tres	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Edificios residenciales, Indonesia
(Yan et al., 2020)	Profundidad y velocidad del flujo	Función logística y exponencial	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Pilares de puentes, Taiwan

Referencia	Parámetros de entrada	Tipo de función	Resultado del modelo	Tipo de edificación
(Kim & Kwak, 2020)	Profundidad del flujo, distancia de la salida, velocidad del flujo y fuerza de impacto	Función logística, sigmoidea en forma de S	Vulnerabilidad, grado de pérdida de 0 a 1	Material de madera, ladrillo y prefabricado, Corea del Sur
(Luo, Zhang, Wang, & He, 2020)	Flujo de momento, profundidad de flujo	Funciones de probabilidad, simulación de Monte Carlo, análisis de empuje de elementos finitos no lineal	Curvas de fragilidad, contornos de fragilidad	Concreto reforzado, China

5. MAPA DE RIESGO QUÍMICO-CONTEXTO PREVIO

El AMVA fue creada para la promoción, planificación y coordinación del desarrollo conjunto y la prestación de servicios de los 10 municipios que la conforman (ver Ilustración 6). Actualmente cumple funciones relacionadas con i) la planificación del territorio puesto bajo su jurisdicción, ii) hacer las veces de autoridad ambiental en la zona urbana de estos 10 municipios y iii) ser autoridad de transporte masivo y metropolitano.

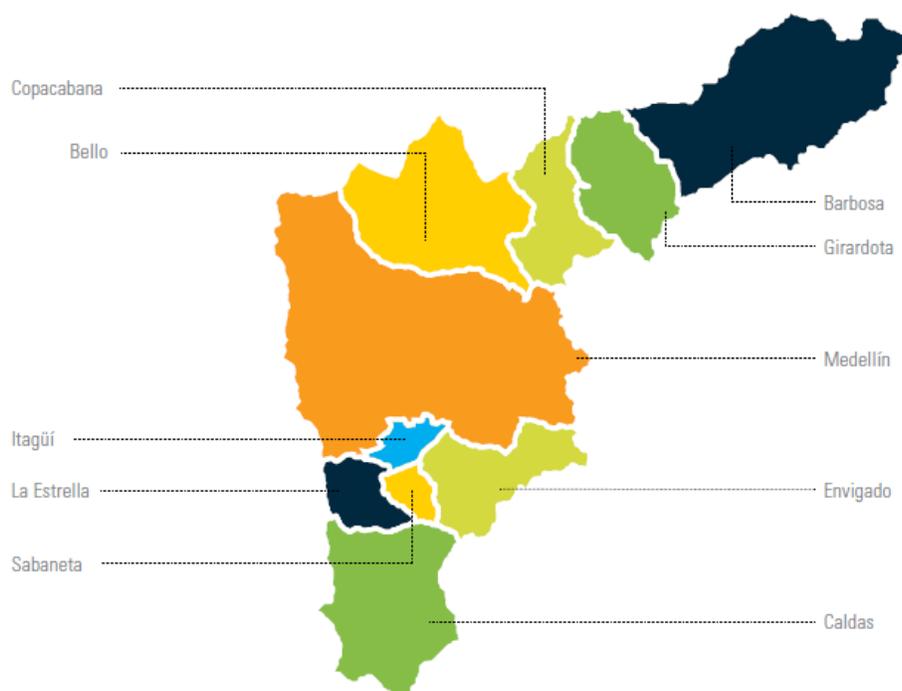


Ilustración 6. Municipios que componen el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Tomado de (AMVA - UNIANDES, 2017)

En cumplimiento de su visión prospectiva y de la Ley 1523 de 2012 en donde se establece que “La gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano”, el AMVA ha venido desarrollando diversos avances en cuanto al riesgo tecnológico como soporte del proceso de toma de decisiones a través de políticas, programas, planes y actividades en los municipios del Valle de Aburrá, siguiendo el principio de corresponsabilidad, correspondencia, solidaridad social y sostenibilidad ambiental. En este sentido, se creó en primera instancia en el año 2005 el Mapa de Riesgo Químico (MRQ-2005) como una herramienta de sistematización, clasificación y visualización de instalaciones industriales fijas en las cuales se manipula, transforma o almacena alguna sustancia peligrosa. Este mapa fue actualizado en primer lugar en el año 2013 (MRQ-2013) y posteriormente en el año 2017 en un proyecto conjunto con la Universidad de los Andes

(MRQ-2017), versión sobre la cual se focaliza este documento. A continuación, se presentan los elementos principales de esta última versión del MRQ, la cual cuenta con 340 instalaciones en el Valle de Aburrá (AMVA - UNIANDES, 2017).

El objetivo de la versión actualizada del MRQ es proponer una metodología para caracterizar las instalaciones que manejan sustancias químicas peligrosas a partir de una evaluación preliminar de peligros. Para ello se planteó la evaluación de cuatro módulos principales:

- **Módulo 1:** Nivel de peligro asociado con sustancias, procesos y servicios. Busca determinar y categorizar los peligros principales de la instalación.
- **Módulo 2:** Distancias de protección y aislamiento de la Guía de Respuesta a Emergencias (GRE) (U.S. Department of Transportation, 2016). Este módulo busca determinar las distancias de atención recomendadas por el Centro de Seguridad de Procesos (CCPS) del Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE).
- **Módulo 3:** Controles administrativos. Identifica los principales controles que implementa la empresa para gestionar sus riesgos.
- **Módulo 4:** Controles de ingeniería. Principales controles de ingeniería para la gestión de riesgos de la empresa.

Estos módulos se evaluaron para cada empresa usando calificaciones de *Muy Bajo/ Bajo/ Medio/Alto* y *Muy Alto* a partir de un proceso de visitas, entrevistas y recolección de información siguiendo una perspectiva de auditoría convencional.

Módulo 1: Peligros por sustancias, procesos y servicios

Este módulo divide el análisis, por un lado, en una clasificación de peligros de las sustancias que se manipulan en cada empresa y, por el otro lado, en una clasificación asociada a los servicios y operaciones que históricamente han estado involucrados en eventos accidentales en el Valle de Aburrá.

Para el primer caso, se contempló una lista de 88 sustancias (Anexo 1) seleccionadas con base en:

- Una revisión de las sustancias reportadas en la Directiva Seveso III
- El sistema de gestión de seguridad de procesos (PSM – Process Safety Management) de la OSHA
- El programa de gestión de riesgo (RMP – Risk Management Programs) de la EPA
- Retorno de experiencias del AMVA

Para cada una de estas 88 sustancias, se evalúa el peligro intrínseco de las sustancias usando el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de tipo físico (i.e., explosivos, inflamables, comburentes), para la salud (i.e., tóxico o carcinógeno) y para el medio ambiente acuático (United Nations, 2013). Adicionalmente, se contempla el nivel del inventario de las sustancias en cada una de las instalaciones de acuerdo con umbrales, tomando referencias internacionales y nacionales.

La segunda parte del análisis contempla la identificación de equipos o actividades que pueden representar un peligro para las personas, medio ambiente e infraestructura. En este sentido se identifican i) calderas (operación a altas temperatura y presión), ii) equipos presurizados (potencial de explosión), iii) acumulación de vapores inflamables (presencia de poca ventilación) y iv) equipos criogénicos (peligro por inestabilidad de sustancias).

Módulo 2: Distancias de Protección y Aislamiento

El objetivo de este módulo es determinar distancias en las que se debe aislar y proteger el personal, de acuerdo con las sustancias peligrosas y sus cantidades (AMVA - UNIANDÉS, 2017). Cabe resaltar que estas distancias no coinciden con perímetros de efectos como radiación (incendio) o el pico de sobrepresión (explosión) en caso de un evento accidental, ni con las distancias de consecuencias (posibles afectaciones).

Para la valoración de este módulo se contempla tanto el nivel de peligrosidad de las sustancias en el módulo anterior, como las distancias reportadas por la Guía de Respuestas a Emergencias (GRE) (U.S. Department of Transportation, 2016). Esta última contempla una distancia de aislamiento inicial, correspondiente al radio desde la fuente de peligro en donde se debe evacuar al personal y una distancia protectora para sustancias tóxicas que se puedan ver favorecidas por la dirección del viento.

Módulo 3: Controles administrativos

El tercer módulo está asociado con la identificación de controles administrativos realizados por la empresa para contrarrestar la ocurrencia de eventos no deseados. Para ello, el MRQ-2017 contempla el uso de los cuatro pilares de la Seguridad de Procesos Basada en Riesgo (RBPS – Risk Based Process Safety):

- I. Compromiso con la seguridad de procesos. En este pilar se resaltan elementos como la cultura de seguridad de procesos, el cumplimiento de estándares, participación de la fuerza laboral, entre otros.
- II. Entendimiento de peligros y riesgos. Este pilar está relacionado con la gestión del conocimiento de los procesos y de la identificación y análisis de peligros.
- III. Gestión del Riesgo. En este pilar se resaltan la integridad de activos, gestión del cambio, gestión de emergencias, entre otras.
- IV. Aprendizaje basado en la experiencia. Para este pilar se enfocan en la investigación de incidentes, métricas, auditorías y la revisión de gerencia y mejora continua.

Módulo 4: Controles de ingeniería

El último módulo incorpora el uso de barreras físicas instaladas con el fin de prevenir la ocurrencia de eventos indeseados (i.e., incendios o explosiones) y limitar sus efectos o consecuencias en caso de ocurrir. Para la evaluación se considera el número de controles, su pertinencia y el cumplimiento de los controles administrativos correspondientes. La Ilustración 7 muestra la ubicación de las empresas en el Valle de Aburrá, contempladas en el MRQ-2017.

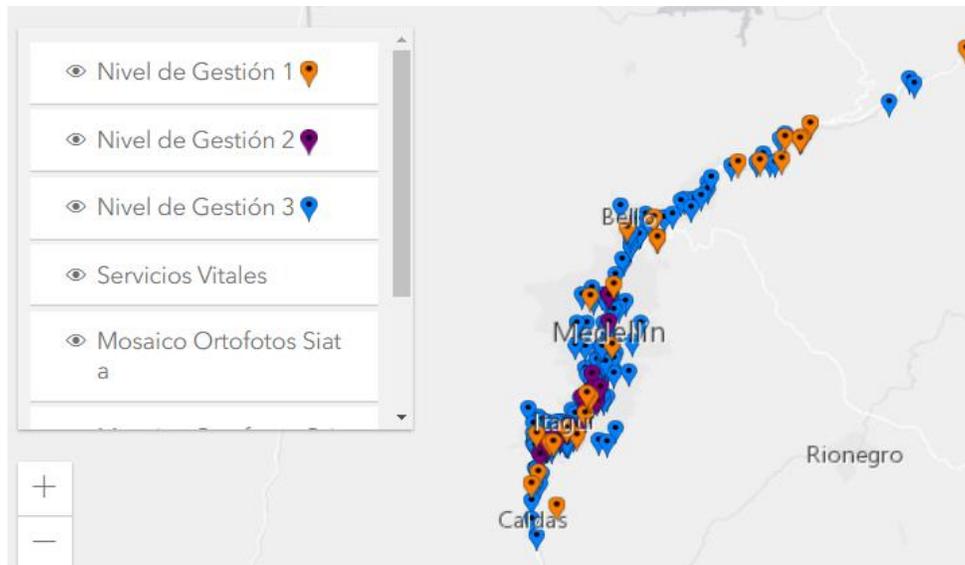


Ilustración 7. Instalaciones en el Valle de Aburrá. Tomado de Ref. (AMVA - UNIANDES, 2017)

En este caso se puede observar que existen tres niveles de gestión, los cuales se establecen según las calificaciones obtenidas por las instalaciones en el módulo 1, que corresponde a los peligros de las sustancias y condiciones de proceso y servicio. Estos niveles de gestión también indican el tipo de análisis de riesgos que se le recomendaría a la empresa realizar e incluyen:

- i) Gestión 1 *Análisis cuantitativo*, en donde se debe tener una frecuencia de visitas cada tres años (65.4%).
- ii) Gestión 2 *Análisis semicuantitativo*, en donde la frecuencia de las visitas es cada dos años (25.8%) y
- iii) Gestión 3 *Análisis cualitativo*, en donde se aconseja realizar su visita de forma anual (8.9%),

En la Ilustración 8 se pueden observar de manera espacial tanto la ubicación como la gestión correspondiente a cada empresa, contemplando microempresas (10 trabajadores), pequeñas (11 a 50 trabajadores), medianas (50 a 200 trabajadores) y grandes (>200 trabajadores).

En Medellín e Itagüí se llevaron a cabo cerca del 60% de las visitas para la recolección de la información y posterior análisis; la mayoría de estas visitas fueron a empresas medianas (42%), seguido de empresas pequeñas (29%), empresas grandes (23%) y finalmente las microempresas (6%). La distribución de las empresas por tipo de instalación se muestra en la Ilustración 8.

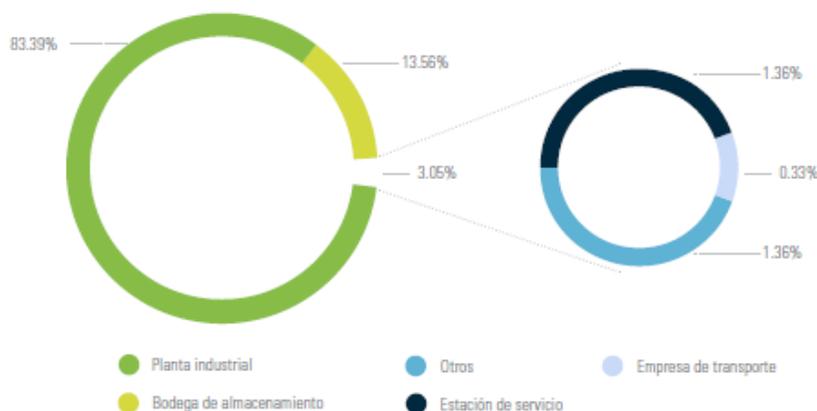


Ilustración 8. Distribución por tipo de entidad. Tomado de Ref. (AMVA - UNIANDES, 2017)

Como se observa en la Ilustración 8, más del 80% de las empresas ubicadas en el Valle de Aburrá son plantas industriales y un 13.5% corresponden a bodegas de almacenamiento, lo que sugiere que más del 90% de las empresas en el territorio pueden manejar, procesar o almacenar sustancias peligrosas. Este panorama pone de manifiesto la necesidad de identificar las amenazas de origen natural presentes en el territorio, con el fin de analizar la posible ocurrencia de eventos Natech, asociados éstos a la ocurrencia conjunta de un accidente tecnológico que involucra la liberación de materiales peligrosos al ambiente, y un evento de origen natural. Por lo anterior, resulta de vital importancia desarrollar una metodología que permita identificar la vulnerabilidad del territorio ante la ocurrencia de eventos Natech con el fin de soportar la toma de decisiones y guiar la implementación de medidas de reducción del riesgo.

La siguiente sección presenta las metodologías propuestas tanto para la caracterización de las amenazas de inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales, como la metodología propuesta para definir un índice de vulnerabilidad de riesgo Natech para zonas del Valle de Aburrá con presencia de instalaciones industriales fijas.

6. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH

6.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH PARA ZONAS DEL AMVA CON PRESENCIA DE INSTALACIONES INDUSTRIALES FIJAS

Esta sección propone un procedimiento para determinar un índice de vulnerabilidad ante escenarios Natech para las zonas del Valle de Aburrá donde existen instalaciones industriales fijas, en función de equipos de proceso críticos, de las sustancias peligrosas utilizadas y su nivel de inventario y la intensidad de los fenómenos naturales a los que están expuestas dichas instalaciones. Además, se focaliza en los escenarios que involucran grandes volúmenes de inventario y con mayor probabilidad de causar la liberación de materiales peligrosos, como consecuencia de los impactos causados por los fenómenos naturales desencadenantes contemplados.

6.1.1 Generalidades del riesgo Natech y su importancia en el ordenamiento territorial

Las amenazas de origen natural tanto geológicas, como hidrometeorológicas que desencadenan accidentes tecnológicos y que involucran la liberación de materiales peligrosos son conocidos como eventos Natech por su acrónimo en inglés *Natural Hazards-Triggered Technological Accidents* (Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E., 2017; Showalter, P. S. & Myers, M. F., 1994) Los Natech se consideran eventos de baja probabilidad, pero de muy alta consecuencia, razón por la cual no suelen ser incluidos en las prácticas tradicionales de evaluación y gestión de riesgos (Cozzani, y otros, 2014). Sin embargo, estos accidentes representan una alta amenaza para la sociedad por la magnitud de sus consecuencias, que pueden resultar en eventos secundarios como incendios, explosiones y dispersión de nubes tóxicas. Es así como los Natech, han demostrado que pueden generar daños más severos y pueden tener impactos ambientales más amplios que los propios eventos de origen natural (Khoirunissa Ariyanta , Khairunisa Jaelani, Suarez-Paba, & Cruz, 2019). Este panorama se torna aún más preocupante si se considera que en general, y a una escala global, hay una mayor densidad poblacional, más industrias y más infraestructura en riesgo (Mileti, 1999).

Sumado a lo anterior, se ha evidenciado un aumento en el reporte de eventos Natech ocurridos en el mundo. Ejemplo de ello son las aproximadamente 19,767 emisiones de materiales peligrosos ocurridas en EE. UU entre 1990 y 2008, representando el 3.43% de todas las emisiones de materiales peligrosos reportadas en la base de datos del Centro Nacional de Respuesta (NRC por sus siglas en inglés). Además, se han identificado 13,146

eventos Natech en el periodo 2009-2017, lo que representa el 5.27% del total de emisiones de materiales peligrosos reportadas (Luo, Cruz, & Tzioutzios, Extracting Natech Reports from Large Databases: Development of a Semi-Intelligent Natech Identification Framework, 2020). Esto demuestra, por lo tanto, que tan solo en EE. UU, hay una tendencia creciente en la ocurrencia de eventos Natech. En Colombia, cifras del Consolidado Anual de Emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres muestran que en el periodo comprendido entre 2004-2016 se reportaron 6477 eventos asociados al derrame de hidrocarburos, de los cuales el 3.2% fue generado por eventos de origen natural o socio-natural (NaTech) (UNGRD, 2018).

De acuerdo con diversos estudios, el incremento en la ocurrencia de eventos Natech puede verse influenciado por los efectos del cambio y la variabilidad climática, lo que en un país como Colombia representa un desafío, por la vulnerabilidad del territorio nacional ante los fenómenos hidrometeorológicos.

Ahora bien, la vulnerabilidad se entiende como la susceptibilidad de un elemento expuesto a sufrir afectación debido a su fragilidad ante la ocurrencia de un evento peligroso (UNGRD, 2017). En un contexto Natech, la vulnerabilidad se asocia directamente con las características estructurales de las instalaciones industriales y su nivel de preparación ante la ocurrencia conjunta de un evento de origen natural severo y un accidente tecnológico, que en combinación pueden generar impactos de gran envergadura con afectaciones al medio ambiente y las comunidades vecinas. Bajo esta perspectiva, es muy importante contemplar los eventos Natech en la planificación del territorio, con el fin de identificar áreas vulnerables ante este tipo de escenarios y propender por medidas de reducción del riesgo que busquen proteger a los habitantes del territorio.

Dinámica accidental

De manera general la dinámica accidental de los escenarios Natech cuenta con 6 grandes elementos. Tal como se muestra en la Ilustración 9, la materialización de un escenario Natech parte de un evento de origen natural, el cual provoca un daño a un parque o instalación industrial que se refleja en una liberación de material peligroso, sea este contaminante, reactivo, explosivo, tóxico o inflamable. Dadas las características fisicoquímicas de las sustancias, estas pueden generar un accidente tecnológico, que se manifiesta en forma de incendio, explosión, derrame, fuga y/o nube tóxica. Estos escenarios pueden tener efectos sobre sistemas contiguos provocando lo que se conoce como un efecto dominó¹. Finalmente, este tipo de escenarios tienen la capacidad de afectar grandes extensiones del territorio, generando impactos sociales, ambientales y económicos significativos y de largo plazo.

¹ Efecto dominó: un conjunto correlativo de sucesos en los que las consecuencias de un accidente previo se ven incrementadas por éstos, tanto espacial como temporalmente, generando un accidente grave (W. H. Heinrich, 1931).

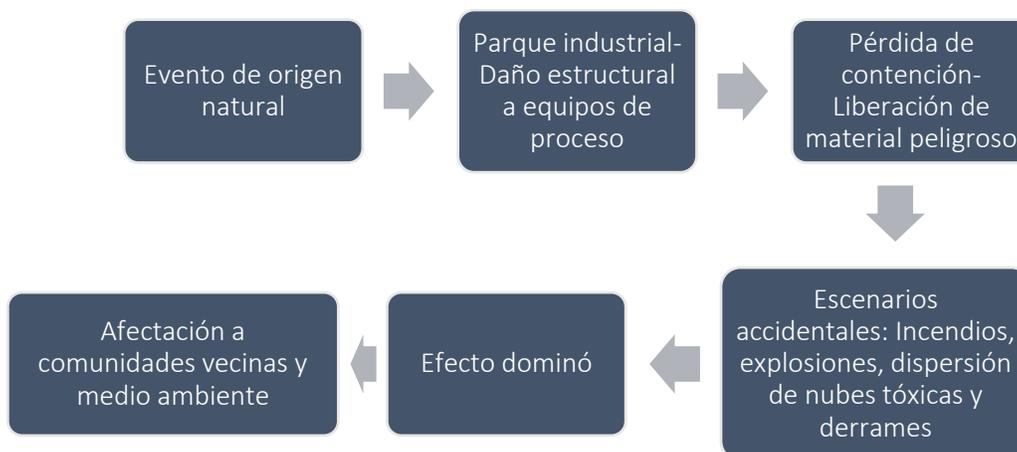


Ilustración 9. Dinámica accidental evento Natech (Fuente: Elaboración propia).

Concomitante con lo anterior, bajo la perspectiva de la materialización de un evento accidental, la secuencia de eventos desencadenantes incluye en primera instancia un evento iniciador, entendido como el mecanismo que favorece la ocurrencia del accidente (Bahr, 2015) y el cual a su vez establece una condición de peligro sobre el sistema que se está evaluando. Un ejemplo de este es una fuente de ignición (como una chispa) que en compañía de un material combustible y de oxígeno, favorece la ocurrencia de un incendio, tal como se ilustra en la Ilustración 10. La dinámica accidental también incorpora los eventos intermedios, los cuales se asocian con incidentes que pueden no propagarse debido a la actuación de sistemas de seguridad que previenen el incremento en la severidad de las consecuencias o, por el contrario, que potencian y agravan estas pérdidas.

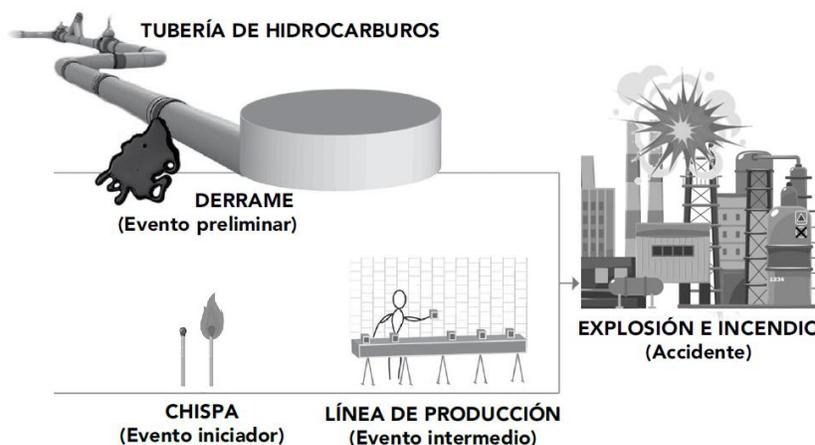


Ilustración 10. Esquema de secuencia de eventos de un accidente. Adaptado de Bahr (2015).

Es así como los escenarios accidentales dependen del estado del material peligroso, sea este líquido, gas/vapor o polvo. Por lo anterior, una vez se tiene una pérdida de contención, la forma como se desarrolla el accidente dependerá no sólo de las características del

material y las condiciones de operación del sistema, sino también de factores del entorno como las condiciones atmosféricas o la dirección y velocidad del viento, entre muchas otras.

En la Ilustración 11, se ilustran posibles escenarios accidentales genéricos que pueden ocurrir dada la liberación de una sustancia tóxica o inflamable, sin contemplar de momento, un evento de origen natural como la causa raíz, puesto que, dependiendo de sus características, los escenarios finales pueden ser múltiples y simultáneos, incluyendo, entre otros, posibles reacciones de sustancias químicas con el agua. Como se observa en esta figura, se resaltan las consecuencias asociadas a un incendio, explosión o dispersión tóxica.

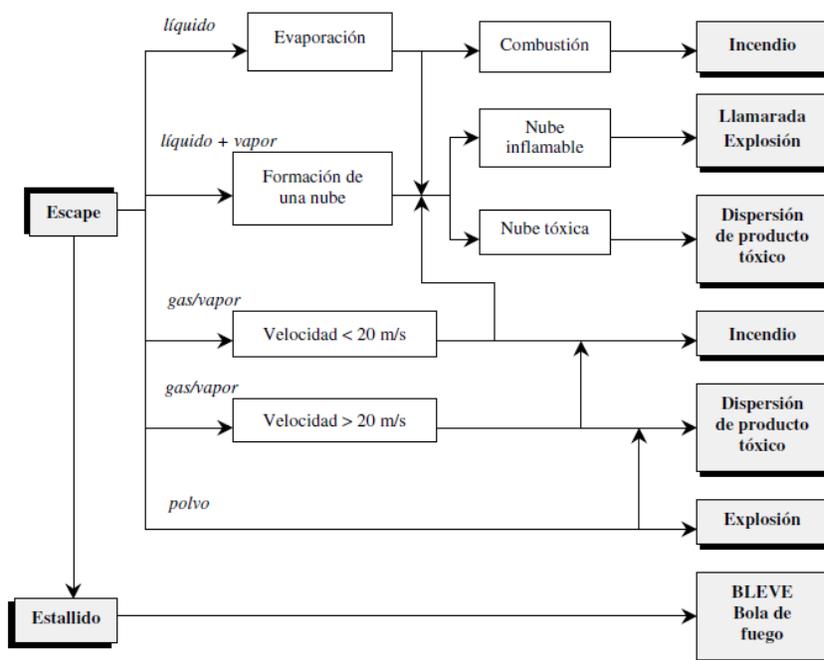


Ilustración 11. Esquema general de los posibles accidentes dado una liberación accidental (Casal, Montiel, Planas, & Vílchez, 1999).

Iniciativas internacionales para gestionar el riesgo Natech e instrumentos normativos nacionales asociados

La gestión de riesgos Natech ha comenzado a reconocerse como una prioridad a nivel internacional, lo que ha suscitado un interés por comprender mejor este tipo de escenarios para proponer medidas de prevención y/o mitigación en caso de su materialización. La preocupación generalizada está directamente relacionada con el aumento constante durante el siglo pasado, en el número y severidad de eventos de origen natural reportados, con una proliferación en el número de personas afectadas y pérdidas económicas asociadas (MunichRe, 2019; EMDAT, 2019). Según las Naciones Unidas y el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres, en los últimos 20 años, tanto los desastres geofísicos como los relacionados con el clima causaron 1.3 millones de muertes y afectaron a 4.4 mil millones de personas. Aunque la mayoría de las fatalidades han sido

causadas por terremotos y tsunamis, los eventos hidrometeorológicos han sido precursores del 91% de todos los desastres (Wallemacq & House, 2018). Además de lo anterior, el número de accidentes tecnológicos también ha aumentado en el último siglo (EMDAT, 2019). Como consecuencia, también se ha confirmado una tendencia creciente en el número de eventos Natech reportados en bases de datos internacionales (Kiyohara, 2016; Krausmann, Renni, Campedel, & Cozzani, 2011; Sengul, Santella, Steinberg, & Cruz, 2012; Luo, Cruz, & Tzioutzios, 2021), en los que recientemente se reveló que los eventos meteorológicos son sus principales precursores (Ricci, Casson Moreno, & Cozzani, 2021).

Bajo este panorama, y con miras a fortalecer el conocimiento y gestión de los escenarios Natech, se han desarrollado diferentes iniciativas internacionales. Algunos ejemplos incluyen la Directiva Seveso III, que requiere la consideración de los impactos de las amenazas de origen natural en las instalaciones industriales reguladas (European Union, 2012). Por otra parte, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) publicó en 2015 un apéndice sobre Natech, dentro de sus Principios Rectores para la Prevención, Preparación y Respuesta ante Accidentes Químicos (OECD, 2003; OECD, 2015). Otro ejemplo del interés internacional que suscitan los escenarios Natech se refleja en el Marco de Sendai de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, el cual resalta la necesidad de mejorar la comprensión y preparación ante los riesgos tecnológicos y los Natech (UNISDR, 2015). Además de lo anterior, la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) ha publicado guías de Palabras en Acción para soportar la implementación del Marco Sendai bajo el enfoque de la evaluación nacional del riesgo de desastres, contemplando los peligros tecnológicos o provocados por el hombre, los cuales incluyen capítulos sobre cómo considerar el riesgo Natech.

En Colombia, los esfuerzos por incorporar el riesgo Natech en los sistemas de gestión nacionales se ven reflejados en la Ley 1523 de 2012 y en el Decreto 2157 de 2017. Estos dos instrumentos se ven soportados por el Decreto 1347 de 2021, recientemente adoptado. De acuerdo con la Ley 1523, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se instaura el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), en su artículo 42 establece que:

"Todas las entidades públicas y privadas encargadas de la prestación de servicios públicos, que ejecuten obras civiles mayores o que desarrollen actividades industriales o de otro tipo que puedan significar riesgo de desastre para la sociedad, así como las que específicamente determine la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, deberán realizar un análisis específico de riesgo que considere los posibles efectos de eventos naturales sobre la infraestructura expuesta y aquellos que se deriven de los daños de la misma en su área de influencia, así como los que se deriven de su operación. Con base en este análisis diseñarán e implementarán las medidas de reducción del riesgo y planes de emergencia y contingencia que serán de su obligatorio cumplimiento".

Como se observa, los análisis requeridos deben considerar los posibles efectos de los eventos de origen natural en la infraestructura expuesta y las posibles consecuencias externas en las áreas circundantes.

Por otra parte, de acuerdo con el Decreto 2157 de 2017, por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas (PGRDEPP), se reglamenta el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. Este plan corresponde a un instrumento para identificar, priorizar, formular, programar, realizar seguimiento y reducir riesgos que puedan provocar daños y pérdidas a su entorno, al igual que dar respuesta a los desastres que puedan presentarse.

El Decreto 1347 de 2021, por su parte, adopta el Programa de Prevención de Accidentes Mayores² -PPAM, que busca incrementar los niveles de seguridad de las instalaciones clasificadas, con el fin de proteger a los trabajadores, la población, el ambiente y la infraestructura, mediante la gestión del riesgo. Tal como lo define este decreto, una instalación clasificada es aquella que tenga presencia de sustancias químicas en cantidades iguales o superiores a al menos uno de los umbrales definidos en su anexo "*Listado de Sustancias Químicas Asociadas a Accidentes Mayores*" o que, al aplicar la regla de la suma, definida en dicho anexo, se obtenga un valor igual o mayor a uno (1).

Bajo este panorama, se plantea una metodología que busca abordar los requerimientos definidos por la Ley 1523 de 2012, en donde en sus artículos 32, 39, 40 y 41 se establece la necesidad de integrar los análisis de riesgo en la planificación territorial. Además, se enmarca en los objetivos de reducción del riesgo del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia. Así mismo, la metodología propuesta se fundamenta en los requerimientos y la hoja de ruta del Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 y está en consonancia con la agenda internacional de Objetivos de Desarrollo Sostenible promovida por Naciones Unidas.

6.2 PROCESO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, la vulnerabilidad se puede definir como la susceptibilidad o fragilidad de tipo física, ambiental o institucional que tiene la comunidad, instalación, o medio ambiente de ser afectada o de sufrir efectos adversos por un evento físico peligroso (Ley 1523, 2012). En este sentido, se reconocen como efectos adversos posibles pérdidas o afectaciones a personas (y sus medios de subsistencia), así como de sus sistemas físicos, sociales y ambientales que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. Para el caso del presente proyecto, estos eventos peligrosos están relacionados con amenazas por 1) inundación, 2) avenida torrencial y 3) movimiento en masa con potencialidad de afectación a instalaciones fijas localizadas en el Valle de Aburrá. En estas instalaciones, como se mencionó anteriormente, se manipulan, transportan o almacenan

² **Accidente mayor:** todo acontecimiento repentino, como una emisión, un incendio o una explosión de gran magnitud, en el curso de una actividad en una instalación clasificada y que trascienda su perímetro, en el que estén implicadas una o varias sustancias químicas peligrosas y que exponga a los trabajadores, a la población, a los bienes, a la infraestructura o al ambiente a un peligro grave, inmediato o diferido. Un accidente mayor puede constituir un escenario de desastre, siempre y cuando cumpla con la generación de una afectación intensa, grave y extendida sobre las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad (Decreto 1347 de 2021).

sustancias que se consideran peligrosas (i.e., inflamables, tóxicas o eco-tóxicas) y, en caso de presentar una pérdida de contención, requieren la evacuación del personal y una gestión diferenciada para sustancias tóxicas que se puedan ver favorecidas por la dirección del viento, de acuerdo con lo reportado en la Guía de Respuesta a Emergencias (U.S. Department of Transportation, 2016).

Cada una de estas instalaciones, cuenta con un conjunto de equipos críticos como tanques de almacenamiento o equipos presurizados, entre otros, que tienen la posibilidad de liberar sustancias peligrosas y desencadenar accidentes mayores como incendios, explosiones, dispersiones tóxicas o derrames contaminantes, los cuales, a su vez, tienen el potencial de afectar a la comunidad circundante, trabajadores y el medio ambiente. La Ilustración 12 esquematiza el marco de análisis de estos eventos Natech.



Ilustración 12. Marco de análisis de un evento Natech (Fuente: Elaboración propia).

En esta figura se puede evidenciar que se parte de una zonificación de amenazas de origen natural (i.e. alta, media y baja), favorecida por diferentes factores como la topografía del suelo, el tipo de suelo, la cercanía con fuentes hídricas, entre muchos otros aspectos, que permiten la identificación de instalaciones sobre las cuales se debe focalizar el análisis. Cada una de estas instalaciones se debe caracterizar en términos de sus equipos críticos, nivel de inventario de materiales peligrosos y los niveles de protección con los que cuenta y su cercanía con otras instalaciones. Con base en esta información se busca determinar la posibilidad de una pérdida de contención, dado un parámetro de intensidad del evento y una posible propagación de las consecuencias a instalaciones industriales vecinas.

El proceso metodológico para construir el índice de vulnerabilidad planteado, tomando en cuenta este marco se muestra en la Ilustración 13. En primer lugar, se plantea la necesidad de hacer una revisión de la literatura respecto al análisis de vulnerabilidad ante eventos Natech, particularmente asociados con inundación, avenidas torrenciales y movimiento en masa. Esto requiere también la revisión de alternativas de métodos cualitativos, semicuantitativos y/o cuantitativos que permitan utilizar la información disponible y que

sirvan como una herramienta de soporte en el AMVA, teniendo en cuenta que el objetivo de este índice es identificar aquellas instalaciones que requieran estudios más detallados.

La segunda etapa de este marco considera un análisis de información del Mapa de Riesgo Químico en la búsqueda, por ejemplo, de una recopilación de eventos accidentales históricos en el área, el retorno de experiencias en cuanto al uso o implementación de nuevas barreras de protección y a una revisión de la tipología de información disponible por cada instalación. Esto permite por un lado vislumbrar si existen inventarios por equipo o por instalación, si están reportadas las condiciones de operación, construcción y/o mantenimiento de equipos de proceso. Finalmente, este proceso busca definir el índice de vulnerabilidad a partir de una selección de parámetros conocidos o que se puedan obtener a partir de la información disponible en el MRQ. Dependiendo de la información disponible, algunos parámetros pueden incluir la intensidad del fenómeno, tipo y cantidad de sustancia, fragilidad de equipos críticos de proceso, entre otros. Lo anterior, viene acompañado de la selección y definición del método de cálculo y la posibilidad de ser aplicado para revisión y validación por parte del AMVA.



Ilustración 13. Proceso metodológico para la construcción del índice de vulnerabilidad (Fuente: Elaboración propia).

6.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA: VULNERABILIDAD ANTE EVENTOS NATECH

Después de reconocer la importancia de participar en la creación de un sistema de datos que recolecte información histórica relevante sobre eventos Natech en el Valle de Aburrá y en especial, en la identificación de variables críticas para la estimación y/o gestión de la condición de riesgo, fue indispensable revisar documentación científica relacionada, que acercara el panorama de los avances en la materia y permitiera utilizar modelos y metodologías vigentes.

A continuación, se muestra la Tabla 12, en la que se condensa la información encontrada en algunas de las publicaciones analizadas en el marco de la revisión de literatura, por el fenómeno de inundación. En esta tabla se muestran el parámetro de intensidad asociado al fenómeno natural, el equipo sobre el cual se hizo el análisis y las variables del equipo consideradas respecto a la resistencia a la falla. Finalmente, se indica si se genera o usa algún tipo de curva de fragilidad, siendo esta última la relación existente entre un parámetro de intensidad del fenómeno y uno de operación del equipo, contra la probabilidad de que ocurra una falla como un pandeo, deslizamiento o flotación del equipo de proceso. Cabe resaltar, que primordialmente existen estudios relacionados con el fenómeno de inundación que afecta instalaciones industriales fijas, motivo por el cual, estos estudios se toman como punto de partida para analizar y correlacionar los impactos correspondientes asociados a los fenómenos de avenida torrencial y movimientos en masa. Lo anterior teniendo en cuenta que los estudios disponibles para estos dos fenómenos naturales se concentran en análisis en tuberías de transporte de hidrocarburos, afectadas por deslizamientos, escenarios que no se contemplan en el presente proyecto.

Tabla 12. Revisión de literatura sobre análisis de vulnerabilidad Natech por fenómenos de inundación

Intensidad fenómeno	Equipo de análisis	Variables del equipo a considerar	Referencia
Profundidad efectiva de agua y velocidad de agua	Recipientes atmosféricos verticales y Recipientes cilíndricos horizontales tanto atmosféricas como presurizadas.	<u>Recipientes atmosféricos verticales</u> : nivel de llenado <u>Recipientes cilíndricos horizontales</u> : además del nivel de llenado, se tiene la resistencia de la conexión entre la vasija y el suelo.	(Antonioni, Landucci, Necci, Gheorghiu, & Cozzani, 2015)
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidad del agua, velocidad del agua • Presión del agua sobre la pared del tanque (Presión estática + presión dinámica) 	Recipientes cilíndricos <u>verticales</u> atmosféricos para el almacenamiento de líquidos (con techo fijo o flotante)	<ul style="list-style-type: none"> • Características de construcción del equipo (Capacidad de almacenamiento, diámetro, altura, espesor de pared) • Presión hidrostática del líquido interno (p.ej., líquido almacenado, altura de llenado) 	(Landucci, Necci, Tugnoli, Antonioni, & Cozzani, 2014)
<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia (periodo de retorno) y severidad (profundidad efectiva del agua, velocidad del agua) • La profundidad efectiva del agua considera el efecto de las 	Tanque horizontal y vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad crítica del agua (vwc) y nivel crítico de llenado para recipientes horizontales. <p>*vwc es una condición de umbral para la velocidad donde la fuerza de arrastre generada por el agua es suficiente para causar la falla de la conexión del perno dada una altura de inundación determinada.</p>	(Landucci, Antonioni, Necci, & Cozzani, 2016)

Intensidad fenómeno	Equipo de análisis	Variables del equipo a considerar	Referencia
barreras de protección implementadas			
Altura, velocidad inundación	Tanque de almacenamiento	Nivel llenado tanque, diámetro, altura tanque, espesor, peso líquido	(Khakzad & Van Gelder, 2018)
Altura inundación, nivel de llenado tanque	Tanque de almacenamiento	Nivel llenado tanque, diámetro, altura tanque, espesor, peso líquido	(Yang, Chen, & Reniers, 2020)

En la Tabla 12 se describen las variables de la amenaza, los equipos de proceso involucrados y la vulnerabilidad de estos equipos frente a la amenaza. Se describen también detalles de nivel cualitativo y modelos que consideran las posibles interacciones entre la instalación industrial y su entorno, y modelos que ofrecen un resumen visual de todos los escenarios de incidentes relevantes que podrían ocurrir en torno a un determinado riesgo.

En esta tabla se empiezan a identificar parámetros clave para la evaluación de la vulnerabilidad de los equipos de proceso (para una inundación) como lo son la altura y la velocidad de la inundación respecto al fenómeno físico, mientras que como elemento fundamental y/o criterio de operación, se identifica el nivel de llenado, el diámetro y la altura del recipiente, como se puede observar en los tres modos de falla de la Ilustración 14, presentados por Khakzad & Van Gelder (2018).

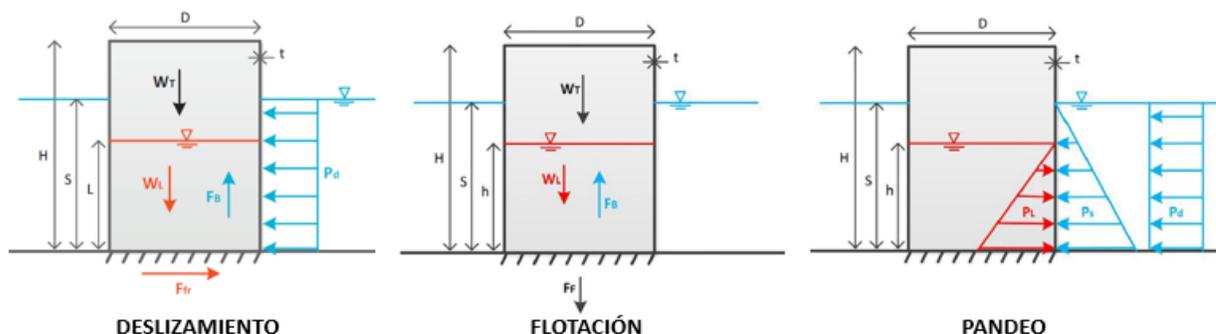


Ilustración 14. Esquemas de modos de falla por inundación por deslizamiento, flotación o pandeo de tanque vertical. Adaptado de Khakzad & Van Gelder (2018)

En cuanto a la revisión de metodologías de análisis, se encontraron diferentes aproximaciones que se pueden caracterizar a partir de información cuantitativa, semicuantitativa o cualitativa. Dentro de las opciones destacadas se hace uso de funciones de estado límite $g = R - S$, en las que, a partir de un conjunto de variables aleatorias que definen un modo de falla particular como pandeo, deslizamiento o flotación de tanques de almacenamiento, estiman la probabilidad de falla usando una resistencia (R) y una sollicitación (S) cuando esta última sea mayor. Esta aproximación sigue una evaluación

rigurosa tomando parámetros de diseño, construcción y operación de los equipos de proceso para definir la resistencia a la falla, mientras que las intensidades y características del fenómeno natural corresponden a la solicitud o la carga ejercida.

Cuando esta información de detalle no está completamente disponible, también se ha contemplado el uso de redes bayesianas, las cuales, tienen su base teórica en el teorema de Bayes con probabilidades a posteriori a partir de cierta evidencia. En este sentido se hace uso de una serie de probabilidades condicionales que estiman la posibilidad de una falla dado unos estados o niveles del evento natural. Este tipo de redes se usa con gran frecuencia debido a su sencillez para representar sistemas complejos y para establecer relaciones existentes entre sus componentes, desde una perspectiva probabilística. Para ello, se hace uso de un método gráfico acíclico que está compuesto de nodos y arcos que representan algún tipo de relación. Un ejemplo de una red para este propósito se observa en la Ilustración 15, donde los nodos se representan como bloques con unos estados y distribuciones dadas mientras que las flechas corresponden con los arcos que definen las relaciones jerárquicas de la red.

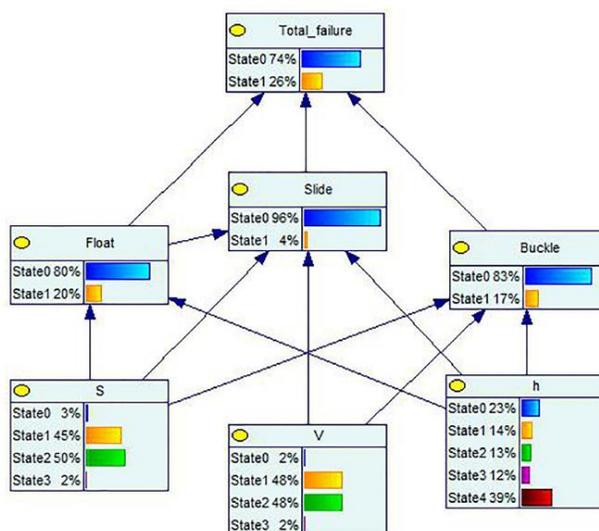


Ilustración 15. Ejemplo de red bayesiana para la evaluación de la probabilidad de falla por inundación. Tomado de Khakzad & Van Gelder (2018)

Además de los modelos desarrollados para evaluar el impacto de eventos Natech desencadenados por inundaciones sobre equipos de proceso, también se han desarrollado otras iniciativas que conciben una visión de territorio, es decir que evalúan los posibles impactos sobre el entorno circundante a la instalación afectada. Ejemplo de estos desarrollos incluyen un sistema de índices para la evaluación regional de riesgos Natech en el cinturón económico del río Yangtze en China, diseñados para cuantificar los impactos por eventos Natech desencadenados por inundaciones, sismos y tifones en la economía, el medio ambiente y la sociedad (Gao, et al., 2021). El índice correlaciona información de:

- las instalaciones industriales, asociada con indicadores como la cantidad de sustancias químicas y su peligrosidad;
- la amenaza natural en términos de indicadores como el nivel de inundación, la descarga máxima y el periodo de retorno;
- la vulnerabilidad asociada a la densidad industrial, la población cercana y la presencia de infraestructura crítica como hospitales, entre otros y
- los mecanismos de control asociados con la proporción de inversión en gestión ambiental, las estadísticas de emergencias y los gastos de conservación de energía y protección ambiental.

Mediante un proceso analítico jerárquico, se realiza una valoración ponderada de pesos para cada uno de los indicadores considerados. Este es un proceso que se basa en una evaluación por pares de cada una de las variables consideradas siguiendo la escala de importancia propuesta por Saaty, en la cual se establece si un criterio es extremada o igualmente importante que otro (Saaty, 1980). Posteriormente, se calcula el índice de riesgo Natech para las amenazas mencionadas anteriormente de manera independiente, mediante la contribución de los indicadores de a) fuente de riesgo, b) factor de peligro, c) nivel del mecanismo de control y d) vulnerabilidad del riesgo. Finalmente, a partir de los resultados del cálculo de los indicadores integrales de riesgo Natech, se obtiene el mapa de distribución de riesgos Natech desencadenados por la amenaza natural para el cinturón económico del río Yangtze (Ilustración 16). Este sistema constituye un aporte para soportar la toma de decisiones y para la formulación de políticas efectivas para la gestión de riesgos en la región.

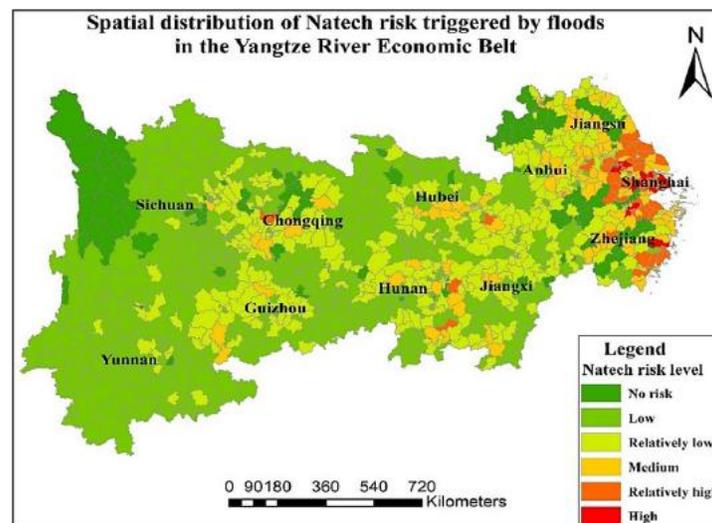


Ilustración 16. Resultados de Gao et al. (2021) para la amenaza de inundación en el cinturón económico del río Yangtze

Otra metodología recientemente desarrollada propone un índice de riesgo Natech como una herramienta rápida y dinámica presentada usando variables discretas, que combinan la frecuencia y magnitud de los eventos y otros factores que contribuyen a potenciar las consecuencias de los eventos Natech desencadenados por inundaciones. Este caso fue

llevado a cabo con información del río Po en Italia (Ilustración 17) y la clasificación de las industrias a su alrededor a través de la normativa Seveso III.

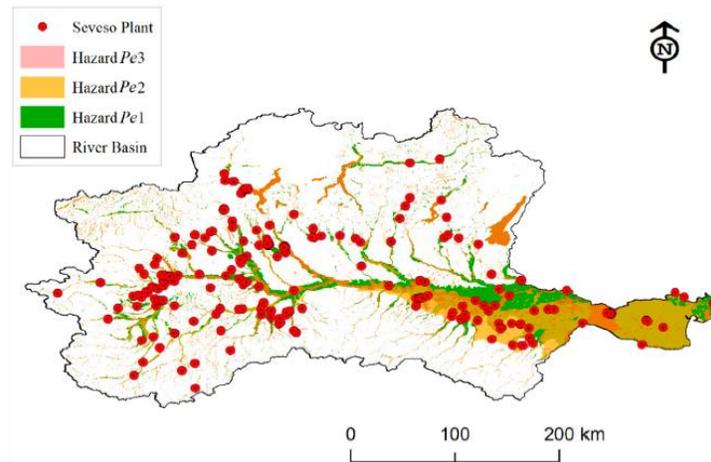


Ilustración 17. Distribución de instalaciones de mayor peligro de un accidente mayor, tomado de Ancione & Milazzo (2021)

Dentro de los factores se incluyen:

- Información georreferenciada como mapas de amenaza por inundación, ubicación de instalaciones industriales y población permanente (hospitales) o transitoria (estudiantes, oficinas, etc.) cercana al área de la instalación
- Información sobre la tipología de la actividad industrial en cuanto a umbrales permisibles de almacenamiento de material peligroso.

Dichos factores que contribuyen al índice de riesgo se combinan dentro de una red bayesiana, que identifica las posibles relaciones causales entre ellos. La construcción del índice se apoya en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite la recolección y procesamiento de información territorial para ser alimentada en la red bayesiana. Por su naturaleza dinámica, la metodología también incluye un criterio para la actualización del índice de riesgo dentro de la red bayesiana (Ancione & Milazzo, 2021).

La revisión presentada anteriormente, nos brinda dos perspectivas para tener en cuenta. Por un lado, si se tiene información detallada sobre equipos de proceso y es posible caracterizar el fenómeno natural, se pueden valorar diferentes modos de falla en equipos críticos dada una intensidad del fenómeno, lo que representa una herramienta robusta para soportar el proceso de toma de decisiones. Por otro lado, en muchos casos esta información no está disponible, por lo que es necesario recurrir a alternativas basadas en información discreta o categórica que clasifique la potencialidad de la liberación y el nivel de peligrosidad de estas sustancias, con miras a valorar zonas más críticas sobre las que es necesario focalizarse y desarrollar herramientas más detalladas.

6.4 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN MRQ Y OTROS

Una vez revisadas algunas alternativas para abordar el índice de vulnerabilidad, se hizo una revisión tanto de la información suministrada por el AMVA con relación al Mapa de Riesgo Químico (MRQ), como de diferentes elementos suplementarios. Dentro de esta información se incluyen reportes atendidos por bomberos, reportes de eventos tecnológicos e información preliminar en cuanto a amenazas de origen natural y sustancias químicas peligrosas para la mayoría de los municipios en el Valle de Aburrá. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de esta revisión de información y las conclusiones obtenidas en cuanto a las aproximaciones revisadas en la sección anterior.

6.4.1 Eventos atendidos por el cuerpo de bomberos

Tomando como punto de partida la información suministrada por el AMVA, se realizó un análisis con los reportes de eventos atendidos por el cuerpo de bomberos desde el año 2018 hasta el mes de marzo del año 2021. Para analizar la información, se consolidaron los datos, unificando la forma de reporte, p.ej., diferencias como mayúsculas y minúsculas, falta de tildes o errores tipográficos. Una vez depurados los datos, se implementaron tablas dinámicas para recoger la información consolidada.

En primer lugar, se delimitaron los municipios que tenían datos recolectados por el equipo de bomberos según los eventos, estos son: Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella y Sabaneta. Los eventos reportados se agruparon según su tipología en incendio, derrame, derrame con incendio, explosión, explosión con incendio, fuga y fuga con incendio. La Ilustración 18 muestra los eventos más recurrentes durante el periodo citado.

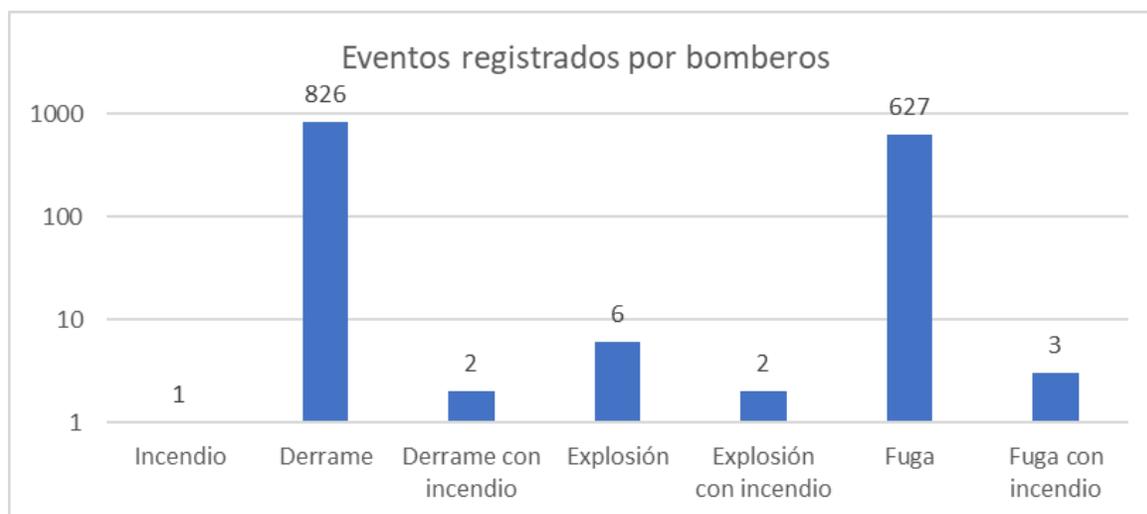


Ilustración 18. Tipología de eventos reportados por bomberos entre 2018-2021 (marzo). Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, los eventos se diferenciaron en nueve clases de peligrosidad para definir la gravedad del evento atendido. La Tabla 13 muestra dicha clasificación y las cantidades involucradas.

Tabla 13. Clasificación de peligrosidad de sustancias involucradas en eventos atendidos por el cuerpo de bomberos. Fuente: Elaboración propia

Clasificación de peligrosidad	
Clase	Cantidad
Clase 1. Explosivos	3 (0.2%)
Clase 2. División 1. Gases inflamables	612 (41.9%)
Clase 2. División 2. Gases No inflamables, no tóxicos	10 (0.7%)
Clase 2. División 3. Gases tóxicos	5 (0.3%)
Clase 3. Líquidos inflamables	787 (53.9%)
Clase 4. División 2. Sustancias que emiten gases inflamables al contacto con el agua	2 (0.1%)
Clase 5. División 1. Sustancias comburentes	12 (0.8%)
Clase 6. División 1. Sustancias tóxicas	3 (0.2%)
Clase 8. Sustancias corrosivas	19 (1.3%)
Clase 9. Sustancias y objetos peligrosos varios	6 (0.4%)
Total general	1459

La Tabla 13 permite evidenciar que la mayor cantidad de eventos registrados corresponde a la división de gases y líquidos inflamables, entre los que se destacan aceites de diferente procedencia (hidráulico, vegetal, motor, etc.), ácidos (muriático, sulfúrico, acético, etc.), combustibles, gas natural o vehicular, líquidos de frenos, mercurio, tintes, entre otros. Aunque la información presentada da una visión panorámica de los diferentes tipos de eventos, se pueden conocer temas puntuales como la dirección, el barrio, la fecha del evento, cantidad de la sustancia involucrada, número de personas fallecidas, si hubo necesidad de evacuar personal y el tipo de afectación (aire, suelo, agua, flora o algún otro elemento no delimitado en la tabla).

No obstante, aunque se cuenta con información juiciosamente consolidada, ninguno de los reportes atendidos por el cuerpo de bomberos ha sido provocado por un evento de origen natural que diera como resultado la pérdida de contención de algún material químico peligroso en instalaciones industriales. La información alude a eventos separados provocados por incendios, derrames o accidentes atendidos.

6.4.2 Eventos atendidos por riesgo tecnológico

Dentro de la información provista se revisó el reporte de eventos atendidos por riesgos tecnológicos, entre 2009 y 2020. De allí se extrajo el número de eventos por municipio, tal como se observa en la Ilustración 19. Se evidencia que Medellín es el municipio en dónde se han atendido un mayor número de eventos tecnológicos, sin embargo, no existe información de detalle en las otras fuentes de información respecto a este municipio, por lo que no se considerará dentro del análisis del índice de vulnerabilidad. La información faltante hace referencia entre otros elementos, a la caracterización de las amenazas de origen natural contempladas en este proyecto. Lo anterior, toda vez que el insumo primordial de información es el MRQ, en donde tampoco se tiene información sobre las empresas e industrias localizadas en el municipio de Medellín.

Se observa también que en los municipios de La Estrella e Itagüí se han atendido 13 y 12 eventos tecnológicos respectivamente en el mismo periodo, lo que sugiere que estos municipios son más propensos a este tipo de escenarios. Esta información permite identificar los municipios expuestos ante la amenaza tecnológica donde se pueda implementar el caso de estudio, puesto que se asume la presencia de sustancias peligrosas. Sin embargo, lo anterior está supeditado al análisis de las amenazas de origen natural en cada uno de estos territorios.

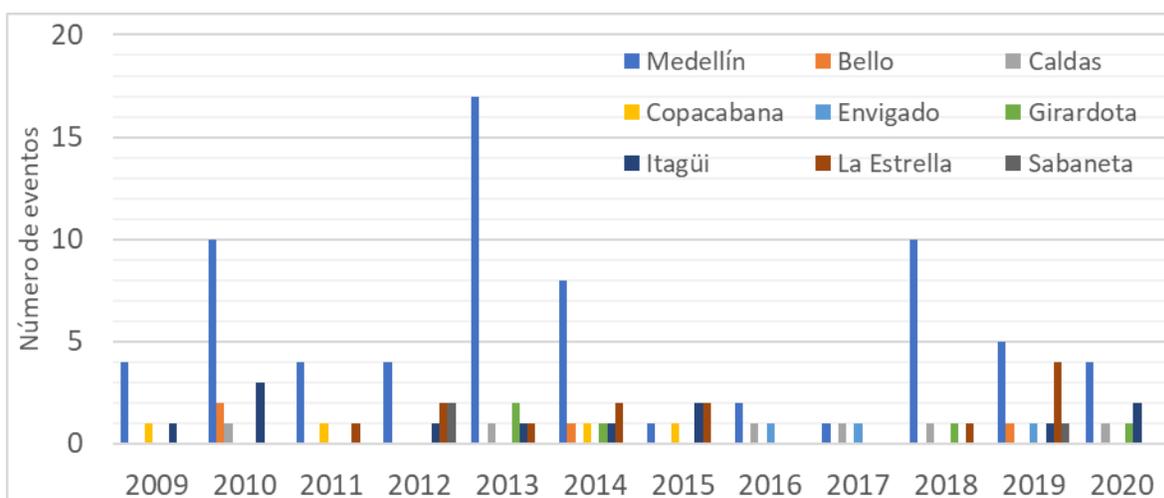


Ilustración 19. Número de eventos atendidos por riesgo tecnológico en el AMVA Fuente: Elaboración propia.

Para complementar lo anterior, también se agruparon los tipos de eventos tecnológicos atendidos en este mismo periodo, encontrando que en su mayoría se asocian con fugas, derrames e incendios. Sin embargo, es importante mencionar que existe un subregistro en estas cifras, puesto que solamente a partir del año 2014 se empezó a incluir la descripción del evento. La Ilustración 20 muestra el resumen de estos resultados, resaltando el hecho

de que recientemente se reportaron dos casi incidentes³ Natech en una misma ubicación, esto es en la estación de servicio Texaco Nuevas Palmas, en donde tanques de almacenamiento de combustible estuvieron expuestos a movimientos en masa el 23/09/2020 y dos meses más tarde se presentó un incidente similar el 20/11/2020. Los detalles de los incidentes ocurridos se desconocen.



Ilustración 20. Tipología de accidentes tecnológicos en el Valle de Aburrá 2009-2020 Fuente: Elaboración propia

6.4.3 Revisión de amenazas naturales y sustancias químicas peligrosas

Se realizó una caracterización de la base de datos de amenazas naturales y sustancias químicas peligrosas, obteniendo la información que se resume en la Tabla 14. Dentro de los resultados se destaca la escasez de información de equipos críticos de proceso y de la sustancia más peligrosa en las instalaciones.

Tabla 14. Caracterización base de datos amenazas naturales y SQP

Nombre Columna	Tipo de dato	Complejidad	Observaciones
ID INSTALACIÓN	Alfanumérico	21%	Identificador de la instalación de la empresa. En total 607 empresas no tienen identificador.
EMPRESA	Cadena de caracteres	100%	Nombre de la empresa donde se hizo la visita
MUNICIPIO	Cadena de caracteres	100%	Incluye los municipios de Barbosa (6%), Bello (9%), Caldas (3%), Copacabana (5%), Envigado (10%), Girardota (13%), Itagüí (35%), La Estrella (10%) y Sabaneta (9%)
MM	Cadena de caracteres	96%	Amenaza de movimiento en masa por instalación: Baja (76%), Media (14%) y Alta (10%)

³ Eventos con el potencial de causar daño significativo, que fue mitigado o reducido por la activación de alguna barrera de protección (Muñoz, Amaya-Gómez, Romero, & Arbeláez, 2015).

Nombre Columna	Tipo de dato	Compleitud	Observaciones
IN	Cadena de caracteres	96%	Amenaza de inundación por instalación: Nula (53%), Baja (15%), Media (9%) y Alta (23%)
AT	Cadena de caracteres	96%	Amenaza de avenida torrencial por instalación: Nula (64%), Baja (6%), Media (1%) y Alta (29%)
OBSERVACIONES	Cadena de caracteres	12%	<p>Observaciones sobre amenazas de origen natural: "AT por dos corrientes, Talud Posterior, Revisar margen quebrada..."</p> <p>-Empresas caso taludes: BYCSA S.A., CUEROS Y DISEÑOS S.A.S., Disolvan y Cía. S.A.S, Ecotransa S.A.S, Electrocontrol S.A.S., Industrias Haceb S.A., Invatam S.A., PROQUIMCOL S.A., Rymel S.A y TINTURAS Y TELAS S.A.</p> <p>-Empresas casos quebradas:</p> <p>Ascrudos S.A.S, COMPAÑÍA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A, Gaseosas Postobón S.A. y Productos Petroleros Industriales Propein S.A.</p>
CIUU	Alfanumérico	90%	Clasificación Industrial Internacional Uniforme (DANE) con las actividades económica por empresa. El 25% de las empresas corresponden con Acabado de productos textiles (4%), Fabricación de sustancias químicas básicas (3%), Fabricación de jabones y detergentes o perfumes (4%), Fabricación de pinturas, barnices y revestimientos (3%), Fabricación de otros productos químicos (4%), Comercio al por mayor de productos químicos (4%) y Comercio al por menor de combustible para automotores (3%)
SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS	Cadena de caracteres	90%	El 50% de las sustancias se concentran en hidróxido de sodio (8%), gases inflamables licuados (6%), ácido sulfúrico (5%), ácido nítrico (5%), oxígeno (5%), acetileno (4%), ácido clorhídrico (4%), mezclas con hipoclorito de sodio (4%) y gasóleo (4%).
SUSTANCIA MÁS PELIGROSA	Cadena de caracteres	68%	El 80% de las empresas que tienen la sustancia más peligrosa contemplan gases inflamables licuados (27%), acetileno (8%), gasolina y nafta (8%), peróxido de hidrógeno (7%), cloro (6%), metanol (5%), etanol (4%), ácido sulfúrico (3%), acrilonitrilo (3%), compuestos de níquel (3%), gasóleo (3%) y amoníaco anhidro (2%).
EQUIPOS	Cadena de caracteres	26%	Los equipos se pueden clasificar en: almacenamiento de sustancias inflamables (26%), calderas (30%), equipos presurizados (41%) y equipos criogénicos (2%). Presenta presiones máximas de diseño y potencia de calentamiento.

Como se mencionó anteriormente, alrededor del 35% de los registros se enfocan en empresas de Itagüí, como se observa en la Ilustración 21 estas empresas tienen un total de 27 equipos presurizados, 24 calderas y 17 equipos de almacenamiento de inflamables. Esta figura también muestra un total de 17 equipos presurizados en Bello y una cantidad total de equipos críticos similar en los demás municipios con algunas excepciones como en el caso de Sabaneta, donde hay una predominancia de calderas y equipos presurizados. Con relación a los equipos con el mayor almacenamiento de inflamables se encuentran en Envigado y Sabaneta, mientras que los equipos criogénicos solo se encuentran en Girardota, Itagüí y Sabaneta.

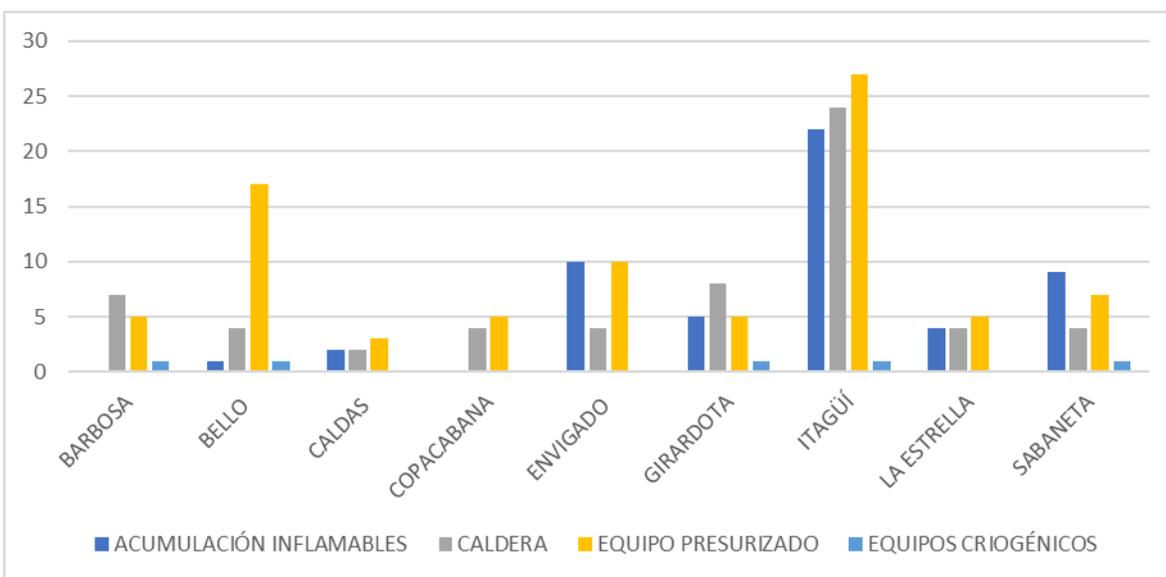


Ilustración 21. Distribución de empresas por municipio y tipo de equipo Fuente: Elaboración propia

Focalizado sobre las áreas con una amenaza alta bien sea por una avenida torrencial, inundación o movimiento en masa, se puede observar que el 90% de los equipos críticos en estas zonas se concentran en los dos primeros casos (Ilustración 22). Tomando en cuenta las amenazas por separado, se observa que los equipos críticos en zonas con amenaza alta por avenida torrencial superan al número correspondiente por una amenaza de inundación, principalmente por los equipos de acumulación de material inflamable. Por su parte, la mayoría de los equipos que se encuentran en áreas con amenaza alta de movimiento en masa corresponden a equipos presurizados, seguidos de calderas. Estos resultados demuestran la importancia del análisis en cuanto a los fenómenos de inundación y avenida torrencial y la necesidad de identificar los casos puntuales de instalaciones expuestas a movimientos en masa.

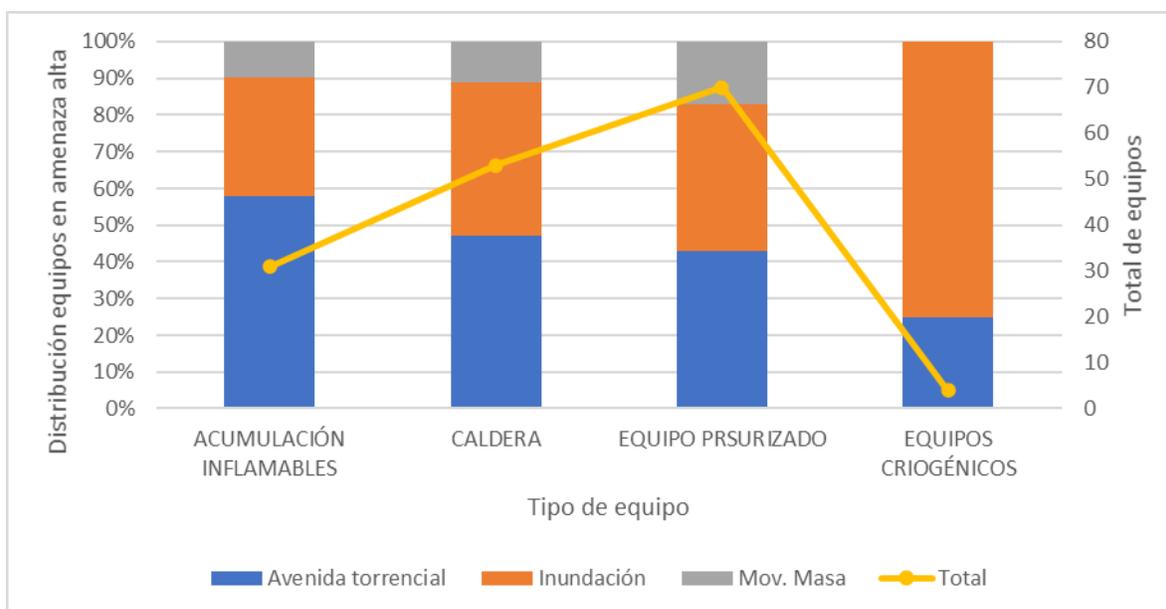


Ilustración 22. Distribución de equipos en zonas de amenaza alta Fuente: Elaboración propia

Para tener una visión mucho más clara sobre la localización de estos equipos en zonas de amenaza, se determinó la distribución por municipio, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 15. Esta tabla permite identificar que los municipios con amenaza alta de movimiento en masa se concentran en Bello (33%), Envigado (29%) y La Estrella (19%). Para el caso de inundación, el 32% de equipos en amenaza alta se encuentran en Bello, seguidos de Itagüí con 25% y Barbosa con 16%. Por su parte, para el caso de avenida torrencial el 64% de los equipos críticos en zonas de alta amenaza están localizados en Itagüí, seguidos por 20% en Bello.

Tabla 15. Distribución de tipo de equipos por municipio en amenaza alta

Amenaza	Municipio	Acumulación de inflamables	Caldera	Equipo presurizado	Equipos criogénicos
Avenida torrencial	Barbosa		1		
	Bello	1	4	9	1
	Caldas	1	1	1	
	Copacabana		1		
	Envigado	2	2	1	
	Itagüí	13	16	18	
	La Estrella	1		1	
	Total	18	25	30	1
Inundación	Barbosa		6	3	1
	Bello	1	4	14	1

Amenaza	Municipio	Acumulación de inflamables	Caldera	Equipo presurizado	Equipos criogénicos
	Copacabana		3	1	
	Envigado		1	1	
	Girardota	1	1	1	
	Itagüí	4	6	6	
	Sabaneta	4	1	2	1
	Total		10	22	28
Movimiento en masa	Bello		1	6	
	Copacabana		1	1	
	Envigado	2	2	2	
	La Estrella	1	1	2	
	Sabaneta		1	1	
	Total		3	6	12

Si se focaliza sobre cada uno de los nueve municipios reportados (Ilustración 23), se puede determinar que Barbosa, Girardota y Sabaneta tienen una predominancia en zonas de amenaza alta de inundación. Para el caso de avenida torrencial, se destacan los municipios de Caldas e Itagüí, mientras que para movimientos en masa La Estrella, Envigado y Copacabana.

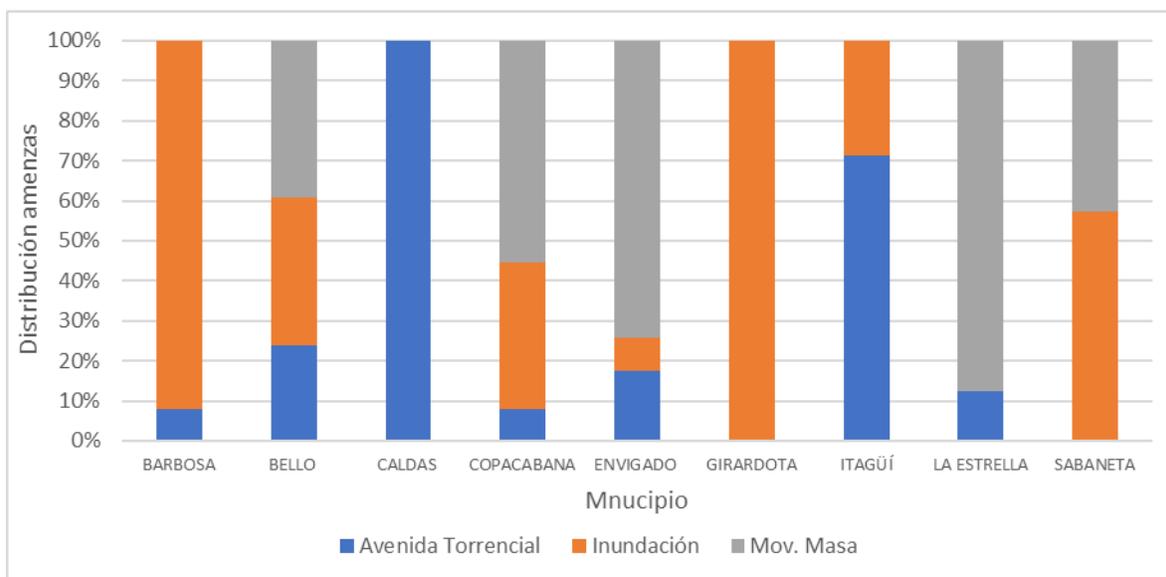


Ilustración 23. Distribución de equipos en zonas de amenaza alta Fuente: Elaboración propia

Para completar la revisión de información disponible, se identificaron cuáles eran las sustancias químicas más peligrosas en zonas de amenaza alta de avenida torrencial, inundación y movimientos en masa, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 16. En esta tabla se relaciona adicionalmente el tipo de equipo crítico: ACUM – Acumulación de inflamables, CAL – Calderas, EP – Equipos presurizados y EC – Equipos criogénicos. Cabe resaltar que se contempló la sustancia química más peligrosa de cada instalación para abordar el peor escenario. Se considera la sustancia con mayor potencialidad de daño, dado que se desconoce en cuáles de los equipos está cada una de las sustancias reportadas para cada una de las instalaciones industriales del MRQ. De esta revisión, se identificó que algunas sustancias inflamables como acetileno, GLP o gasóleo se utilizan en instalaciones con presencia de calderas o equipos presurizados, con la potencialidad de generar un evento de incendio o explosión, dada una liberación de material. Sin embargo, se reporta en menor medida la posibilidad de acumulación de material inflamable. También se puede observar que hay sustancias corrosivas, tóxicas y que pueden tener un gran impacto ambiental en el medio acuático o contaminación terrestre.

Tabla 16. Distribución de sustancias peligrosas por municipio en amenaza alta

Amenaza	Sustancia más peligrosa	ACUM	CAL	EP	EC
Avenida torrencial	Acetileno		2	1	
	Ácido sulfúrico		1	1	
	Amoníaco anhidro	1	1	1	
	Cloro	2	2	3	1
	Compuestos de níquel en forma pulverulenta inhalable: monóxido de níquel, entre otros.	1	1	2	
	Disolvente No 3		1	1	
	Etanol	1	2	2	
	Fosfina	1	1	1	
	Gas natural	1		1	
	Gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 (incluido el GLP)	2	5	10	
	Gasóleo		1		
	Peróxido de hidrógeno	2	4	1	
	TOLUENO		1		
	Total		10	22	25
Inundación	Acetileno		2	2	1
	Ácido sulfúrico		1		
	Acrilonitrilo		1	1	
	Cloro	2	3	3	1
	Compuestos de níquel en forma pulverulenta inhalable: monóxido de níquel, entre otros.			1	

Amenaza	Sustancia más peligrosa	ACUM	CAL	EP	EC
	Dicromato de sodio	1	1	1	
	Etanol	1	2	2	
	Fosfina	1	1	1	
	Gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 (incluido el GLP) y gas natural	1	5	11	
	Gasolina	1		2	
	Metanol		1		
	Resina epóxica	1			
	Trióxido de arsénico, ácido arsenioso (III) y/o sales		1	1	
	Total	7	19	25	2
Movimiento en masa	Disolvente No 3	1		1	
	Gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 (incluido el GLP) y gas natural		1	4	
	Gasolina			2	
	Solvente Stoddard			1	
	Total	1	1	8	0

Esta información es corroborada usando el rombo de seguridad de la NFPA 704, la cual hace referencia a un etiquetado que clasifica cada sustancia en términos de su nivel de inflamabilidad, riesgo para la salud (toxicidad), reactividad y riesgos específicos. Con relación a la inflamabilidad, esta norma contempla el punto de inflamación (*flashpoint*) de la sustancia, el cual corresponde con la temperatura en la cual genera suficientes vapores para formar una mezcla inflamable en presencia de aire. Los niveles corresponden a:

- Nivel 0 – Sustancia que no se inflama bajo condiciones normales
- Nivel 1 – Requiere un precalentamiento para formar mezcla inflamable (*Flashpoint* superior a 93°C)
- Nivel 2 – Necesita un calentamiento moderado (*Flashpoint* debajo de 93°C)
- Nivel 3 – Inflama fácilmente en condiciones ambientales (*Flashpoint* debajo de 37°C)
- Nivel 4 – Se vaporiza completamente y se inflama fácilmente (*Flashpoint* debajo de 25°C)

Con relación al nivel de riesgo para la salud, los niveles especificados por la NFPA son:

- Nivel 0 – No hay peligro
- Nivel 1 – Poco peligroso, irritación significativa por exposición
- Nivel 2 – Peligroso, incapacidad o lesión temporal
- Nivel 3 – Muy peligroso, lesión seria o permanente
- Nivel 4 – Potencialmente mortal

Para el caso de los niveles de reactividad se tiene:

- Nivel 0 – Sustancia normalmente estable
- Nivel 1 – Inestable en caso de calentamiento
- Nivel 2 – Inestable en caso de que haya un cambio químico violento
- Nivel 3 – Puede explotar en caso de un golpe o por calentamiento
- Nivel 4 – Puede explotar o tener una reacción explosiva súbitamente

Finalmente, este rombo indica los siguientes peligros especiales:

- Sustancia oxidante (puede favorecer una reacción de combustión)
- Reactivo en presencia con agua
- Asfixiante simple
- Corrosivo
- Peligro biológico

Con base en lo anterior, se construye un consolidado del listado de las sustancias más peligrosas para cada instalación industrial perteneciente al Mapa de Riesgo Químico del AMVA. En la Tabla 17 se presenta dicho listado de sustancias con la correspondiente clasificación de seguridad según la NFPA 704, considerando su inflamabilidad, riesgo para la salud, reactividad y riesgo específico. Esta información sirve como punto de partida para determinar los posibles escenarios desencadenantes dada la liberación de estas sustancias por el impacto de un evento de inundación, avenida torrencial y/o o movimiento en masa en las instalaciones industriales que las almacenan o procesan.

Tabla 17. Clasificación según NFPA de sustancias más peligrosas identificadas en el MRQ

Sustancia más peligrosa	Inflamabilidad (rojo)	Riesgo salud (azul)	Reactividad (amarillo)	Riesgo específico (blanco)
Acetileno	4	0	2	
Ácido sulfúrico	0	3	2	Corrosivo, No usar agua
Acrilonitrilo	3	4	2	
Amoníaco anhidro	1	3	2	Corrosivo
Cloro	0	3	0	Oxidante
Dicromato de sodio	1	3	1	
Disolvente No 3	2	0	0	
Etanol	3	0	0	
Fosfina	4	4	2	No usar agua
Gas natural	4	1	0	
Gases inflamables licuados categorías 1 o 2	4	1	0	

Sustancia más peligrosa	Inflamabilidad (rojo)	Riesgo salud (azul)	Reactividad (amarillo)	Riesgo específico (blanco)
(incluido GLP)				
Gasóleo	2	1	0	
Gasolina	3	1	0	
Metanol	3	1	0	
Peróxido de hidrógeno	0	2	3	Oxidante
Resina epóxica	1	2	0	
Solvente Stoddard	1	2	0	
Tolueno	3	2	0	
Trióxido de arsénico, ácido arsenioso (III) y/o sales	0	3	0	

6.4.4 Conclusiones sobre información revisada

La revisión de la información provista por el AMVA permitió identificar los elementos a considerar para proponer el índice de vulnerabilidad Natech. El análisis de la información también ha permitido identificar la información real con la que se cuenta y sobre la cual se debe establecer la base para la construcción del índice que se ajuste al contexto actual de las instalaciones industriales del Valle de Aburrá expuestas a las diferentes amenazas contempladas en el presente proyecto. De acuerdo con lo anterior, se plantean 3 categorías de información, tal como se observa en la Ilustración 24. Esta información constituye por lo tanto el punto de partida para construir sobre ella y refinar las variables a incluir en el índice de vulnerabilidad propuesto.



Ilustración 24. Categorías de información propuestas de acuerdo con información suministrada por el AMVA

6.5 DEFINICIÓN DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD NATECH

La naturaleza inherente de los eventos Natech de generar escenarios accidentales múltiples y simultáneos cuando se materializan, hace que su gestión requiera de una

comprensión integral de las interdependencias de los sistemas humanos, naturales y tecnológicos. Por lo tanto, para comprender y gestionar apropiadamente estos riesgos complejos, se requiere un cambio de paradigma que implica una visión más amplia del territorio, en donde se considera la interacción de las instalaciones industriales con su entorno. Esto a su vez requiere que los peligros y amenazas sean analizados según su contexto, no sólo desde el punto de vista de los fenómenos naturales, sino desde la perspectiva de la peligrosidad de una instalación industrial, los equipos críticos de proceso, las sustancias peligrosas que almacena, manipula o procesa, entre otros (Suarez-Paba & Cruz, A paradigm shift in Natech risk management: Development of a rating system framework for evaluating the performance of industry, 2022).

Lo anterior sugiere que se requiere un enfoque sistémico del riesgo que considere los diferentes elementos que interactúan en un territorio con presencia de instalaciones industriales que, de estar expuestas ante una amenaza de origen natural, pueden desencadenar un evento Natech. Estos elementos de interacción incluyen 1) la amenaza de origen natural, 2) la vulnerabilidad industrial y poblacional, 3) la exposición de la infraestructura y de la comunidad y 4) la capacidad de respuesta. Cabe mencionar que la vulnerabilidad industrial también contempla la peligrosidad de las sustancias allí presentes y su rango de inventario, así como la peligrosidad de los equipos de proceso.

Bajo este panorama y teniendo en cuenta la información revisada y las discusiones realizadas entre el equipo técnico, se identificaron, en una primera instancia, un conjunto de parámetros que constituyen la base sobre la cual se construye el índice de vulnerabilidad Natech. La Ilustración 25 muestra los parámetros identificados, sin embargo, cabe resaltar que en algunos casos éstos se basan en análisis históricos de eventos accidentales ocurridos en la instalación, su ubicación geográfica o la posibilidad de la ocurrencia del evento de origen natural, información que puede no estar disponible para su análisis en los diferentes municipios del Valle de Aburrá y para las empresas distribuidas en esta área.

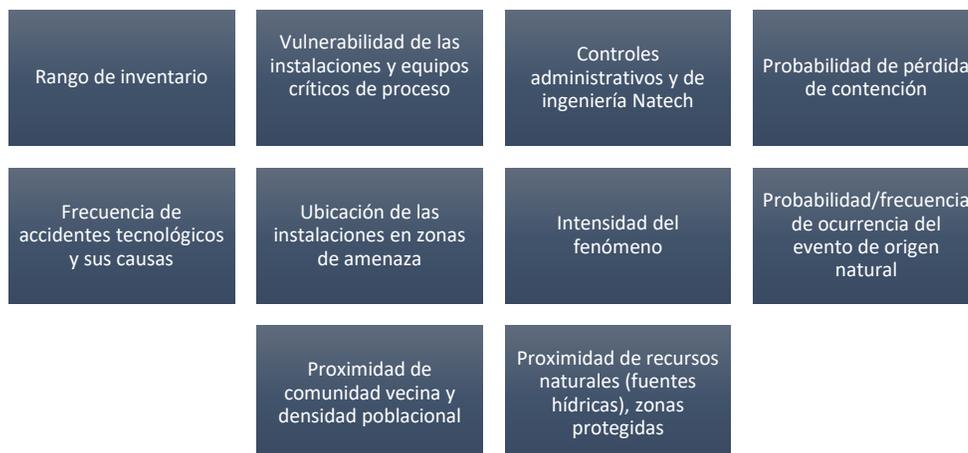


Ilustración 25. Parámetros preliminares para construir el índice de vulnerabilidad. (Fuente: Elaboración propia)

La anterior identificación de parámetros se enriqueció, refinó y ajustó a la realidad de la información disponible, luego de la revisión de la información provista por el AMVA (ver sección 6.4). Lo anterior, tanto desde el punto de vista de la amenaza de origen natural, como desde la información suministrada en el MRQ. Subsecuentemente, al abordar y dar respuesta a preguntas como:

- ¿Existe información de inventario por equipo o solo un inventario total de las sustancias peligrosas que se manejan, manipulan o almacenan en la instalación?
- ¿Existe información de operación, llenado de equipos o tipo de material de estos?
- ¿La información asociada a controles de ingeniería contempla simplemente la existencia de alguna medida o también si todavía están activas?

Se logró precisar en los elementos que guiaron la construcción del índice. Es así como se determinaron las variables a considerar para el índice de vulnerabilidad Natech, de acuerdo con la información disponible en el MRQ y la caracterización de las amenazas de origen natural. Como consecuencia, en términos generales se proponen 4 categorías a saber:

- Intensidad de la amenaza de origen natural (i.e. desplazamientos, altura lámina de fluido (h), velocidad (v) y flujo de momento ($h v^2$))
- Peligrosidad industrial asociada con el inventario de sustancias químicas, sus propiedades y la peligrosidad de equipos de procesos identificados en el MRQ
- Densidad industrial según proximidad de instalaciones industriales en cada municipio, definida con un mapa de calor que indica las zonas donde se encuentra la mayor cantidad de industrias cercanas entre sí. (ver Ilustración 26)
- Controles de ingeniería, según niveles determinados en el MRQ

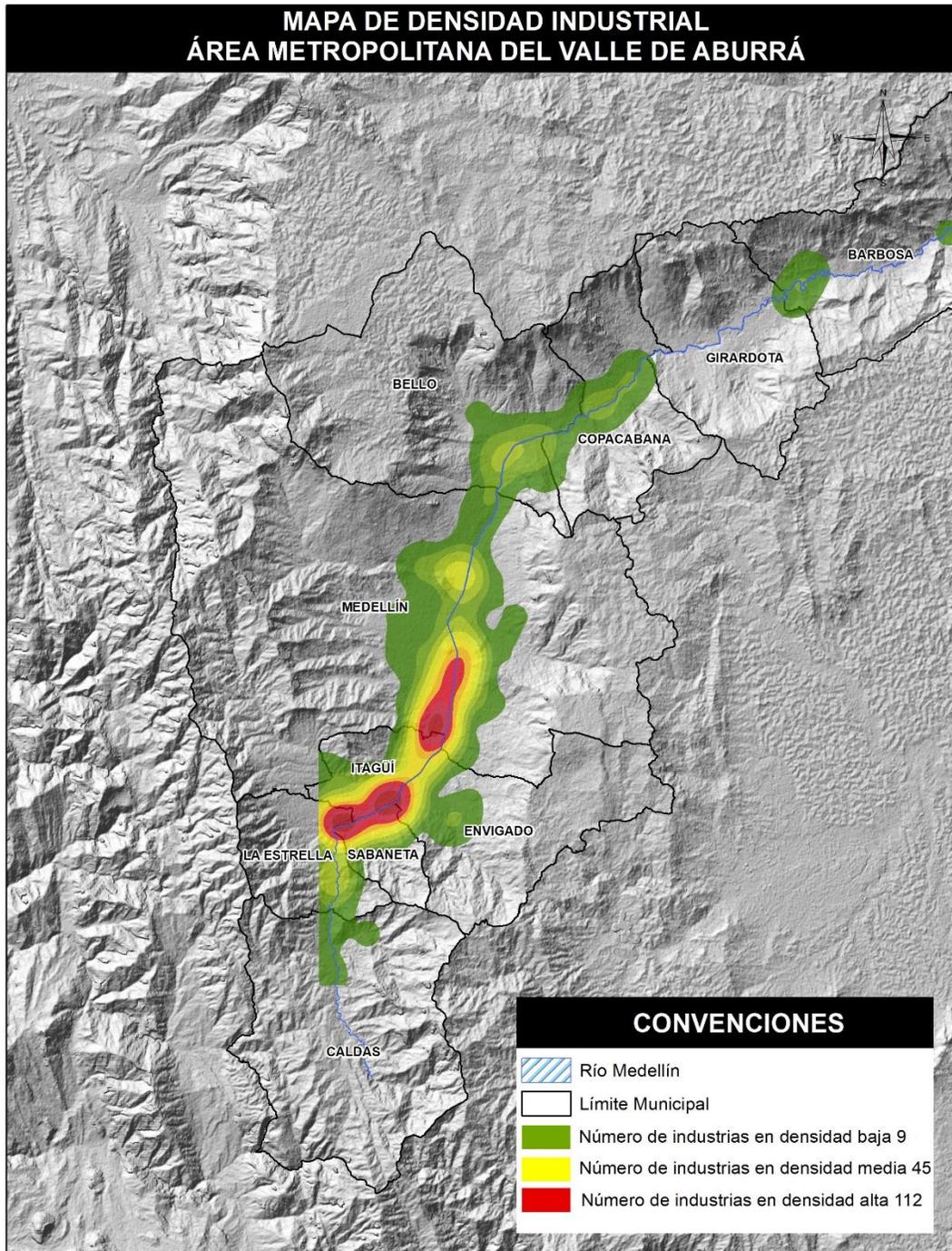


Ilustración 26. Densidad industrial en el Valle de Aburrá de acuerdo con la proximidad de las instalaciones industriales

La relación entre las probabilidades asociadas a las variables descritas en estas categorías es condicional, puesto que el evento desencadenante de un accidente Natech siempre es el evento de origen natural, sea este la inundación, la avenida torrencial o el movimiento en masa. Además, la liberación de los materiales peligrosos dependerá del grado de daño de

la infraestructura y equipos de proceso de la instalación industrial, así como de la proximidad de otras instalaciones industriales que podrían verse afectadas por efectos dominó. Por lo tanto, para el cálculo del índice de vulnerabilidad Natech es importante determinar la cadena de eventos que pueden desencadenar en el evento final indeseado, que para este caso es la pérdida de contención. La Tabla 18 muestra la cadena de eventos y sus variables asociadas que llevan a la materialización de un evento Natech manifestado por la pérdida de contención dado el fenómeno natural con una intensidad definida.

Tabla 18. Variables asociadas con la cadena de eventos que desencadenan en un evento Natech

Índice de vulnerabilidad				
Probabilidad del evento natural ($h\nu^2$) asociado a la intensidad del fenómeno.	Falla de las instalaciones o bodegas de almacenamiento (infraestructura)	Falla del equipo crítico	Se pierde la contención de una sustancia peligrosa (ocurre la liberación del químico)	Densidad industrial asociada a posibles efectos dominó
	Alto – Medio – Bajo	Si – No	Si - No	Si – No

De esta forma, una primera aproximación para determinar el índice de vulnerabilidad Natech, es plantear la relación probabilística de las variables de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(\text{Evento Natech}) &= \mathbb{P}(FN) \cdot \mathbb{P}(\text{falla}_{inf}|FN) \cdot \mathbb{P}(\text{falla Eq. Cr} | \text{falla infra ó FN}) \cdot \\
 &\quad \mathbb{P}(PC|\text{falla Eq. cr}) \cdot \mathbb{P}(\text{Evento tecnológico})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Donde

- $\mathbb{P}(FN)$ es la probabilidad de ocurrencia del fenómeno natural. En este caso, de una inundación, avenida torrencial o movimiento en masa.
- $\mathbb{P}(\text{falla}_{inf}|FN)$ la probabilidad de que la infraestructura falle dada la ocurrencia de un fenómeno natural, esta probabilidad puede representar la probabilidad de falla de las barreras. Esto se refiere a que la intensidad provocada por el evento natural sea tal que comprometa la integridad de la infraestructura.
- $\mathbb{P}(\text{falla Eq. Cr} | \text{falla infra ó FN})$ es la probabilidad de que un equipo crítico de proceso falle, bien sea porque se encuentra dentro de una infraestructura (edificaciones) de la instalación industrial que falló o dada la intensidad propia del fenómeno natural.
- $\mathbb{P}(PC|\text{falla Eq. cr})$ es la probabilidad de que se presente una pérdida de contención de una sustancia peligrosa dada la falla en un equipo crítico de proceso.
- $\mathbb{P}(\text{Evento tecnológico})$ corresponde con la potencialidad de que un evento tecnológico se materialice dada la liberación del material peligroso (i.e. probabilidad de que las sustancias liberadas reaccionen con el agua, sean tóxicas, explosivas o inflamables).

- $\mathbb{P}(\text{Evento Natech})$ corresponde con la potencialidad de que ocurra un evento Natech.

La estructura mostrada en la Ec. (10) abarca un marco general desde la ocurrencia del fenómeno natural, incluyendo posibles fallas en cadena que este podría causar directa o indirectamente, hasta la potencialidad de materialización de un evento tecnológico, dadas las propiedades de peligrosidad de las sustancias. Esta aproximación requiere información acerca de los equipos y de la infraestructura, que por el momento no se encuentra disponible. Por tal motivo, se propone un ajuste con base en la información suministrada y revisada, la cual no contempla detalle de los equipos de proceso ni del tipo de construcciones o infraestructura presentes en las instalaciones industriales. De esta forma, la expresión de la Ec. (11) permite que la potencialidad de que un evento Natech se materialice, se centre en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno natural $\mathbb{P}(FN)$, la probabilidad de pérdida de contención dado el fenómeno natural $\mathbb{P}(PC|FN)$ y la probabilidad de ocurrencia del evento tecnológico dada una pérdida de contención $\mathbb{P}(\text{Evento Tecnológico}|PC)$, esta última asociada también a la peligrosidad de las sustancias y sus rangos de inventario. Un esquema de esa simplificación se muestra en la Ilustración 27

$$\mathbb{P}(\text{EventoNatech}_i) = \mathbb{P}(FN) * \mathbb{P}(PC|FN) * \mathbb{P}(\text{EventoTecnológico}|PC) \quad \text{Ec. (11)}$$

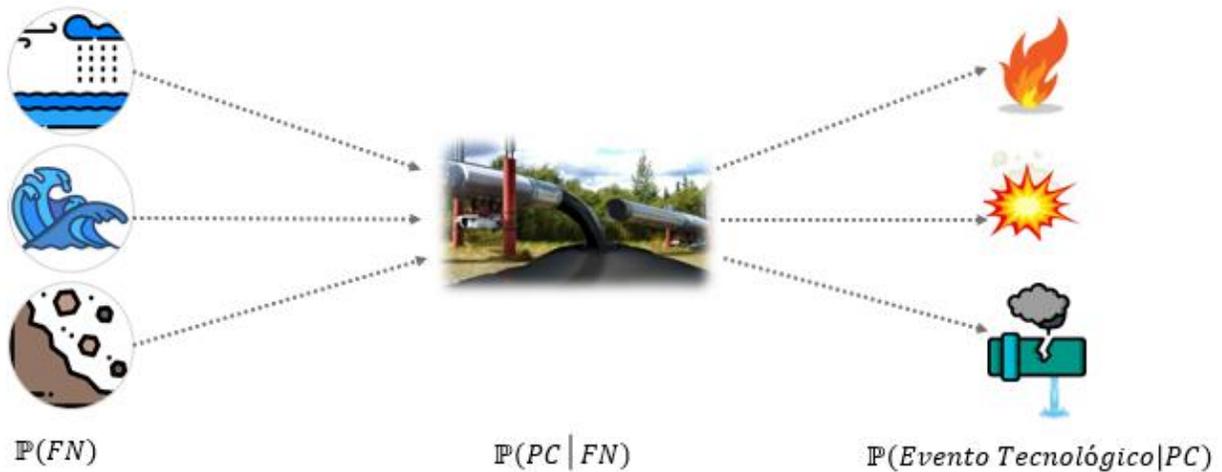


Ilustración 27. Esquema propuesto de la cadena de eventos contemplados para evaluar el índice de vulnerabilidad Natech. Fuente: Elaboración propia

La principal diferencia entre las dos aproximaciones es que no se contempla la evaluación de daño ni a la infraestructura ni al equipo crítico, sino que se concentra en la posibilidad de que una cierta intensidad de un fenómeno natural (i.e. hv^2 , siendo h la altura de la inundación y v su velocidad) pueda desencadenar en una liberación o pérdida de contención de una sustancia peligrosa. Esto implica que no se concentra en una evaluación

extensiva de todos los modos de falla de los equipos ni en sus dinámicas de pérdida. Esta perspectiva permite entonces enfocarse en la pérdida de contención, desde el punto de vista de la vulnerabilidad de las instalaciones industriales ante las amenazas de inundación, avenida torrencial y movimientos en masa. Es así como se propone una aproximación a las variables y su cálculo, de acuerdo con las ideas presentadas en la Tabla 19 .

Tabla 19. Descripción de variables para el cálculo del índice de vulnerabilidad Natech

Densidad industrial (proximidad y peligrosidad de la sustancia)	$\mathbb{P}(PC FN)$	Número de instalaciones dentro del área de evacuación de cada empresa, definido por un búfer alrededor de sus límites
Fenómeno natural	$\mathbb{P}(FN)$	Intensidad y temporalidad del fenómeno natural. La temporalidad se contempla en su periodo de retorno. Cada fenómeno natural tiene diferentes niveles y variables de intensidad (i.e. hV^2 para el caso de inundación, avenidas torrenciales, movimientos en masa en pata de taludes).
Susceptibilidad de la instalación a la amenaza de origen natural	$\mathbb{P}(PC FN)$	Se asume que si la instalación se encuentra dentro de la mancha de la amenaza es susceptible a un evento de tipo Natech. Variable Booleana (SI/NO)
Susceptibilidad de falla de integridad de un equipo crítico	$\mathbb{P}(PC FN)$	Refleja la relación entre la probabilidad de liberación completa y el nivel de amenaza. Se asume: Hay liberación completa siempre que se tenga amenaza media o alta.
Potencial de pérdida de contención/liberación (densidad industrial y rango de inventario)		Refleja la relación entre el potencial de pérdida de contención y la intensidad del fenómeno. Liberación completa cuando la intensidad del fenómeno es alta. Liberación parcial cuando la intensidad del fenómeno es media. No hay liberación cuando la intensidad del fenómeno es baja.
Potencial de eventos tecnológicos (asociado a la condición de riesgo).	$\mathbb{P}(Evento\ Tecnológico PC)$	Escenarios finales (consecuencias) incendios, explosiones, dispersión de nubes tóxicas, contaminación (sí/no)

Ahora bien, respecto a cada una de las variables mencionadas en la Tabla 19, es importante definir su estimación o cálculo, para lo cual, en este momento del desarrollo del proyecto, se tienen las siguientes aproximaciones:

Densidad industrial

La densidad industrial en algunos espacios dentro del Valle de Aburrá aumenta la probabilidad de tener consecuencias mayores al momento de presentarse un evento Natech. Esto se debe a factores desfavorables después de ocurrido el evento natural que puede generar un efecto dominó. Por ejemplo, la mezcla de productos químicos liberados desde diferentes industrias aumentaría la condición de riesgo para aquellos actores bióticos, abióticos y humanos que se encuentren alrededor, sea por incendio, absorción, explosión, ingestión o inhalación. Esta claramente dependerá de la severidad del evento desencadenante, toda vez que debe constituir un evento de gran magnitud para llegar a afectar a las instalaciones vecinas.

Tomando la densidad como un factor importante dentro del estudio, se hace uso de los polígonos consolidados de las industrias dentro del *shape* de predios del MRQ. Inicialmente se buscó poner en práctica la noción de distancia de un kilómetro a la redonda de cada industria, tal como lo proponen Milazzo y Ancione (2021). No obstante, la medida resultó muy conservadora para ser implementada dentro del Valle de Aburrá. En cambio, se optó por unas medidas menores alrededor de las industrias llegando a definir una primera distancia indicativa de 50 metros a la redonda de los polígonos prediales de éstas, tal como se muestra en la Ilustración 28. Lo anterior, teniendo en cuenta la información de distancia de aislamiento asociada con la peligrosidad de las sustancias, provista en el MRQ. Subsecuentemente se contemplaron distancias de 100m, 150m y 300m, para analizar el número de instalaciones industriales cercanas a la instalación bajo análisis. Los detalles de esta metodología se describen a profundidad en la sección 7.1.

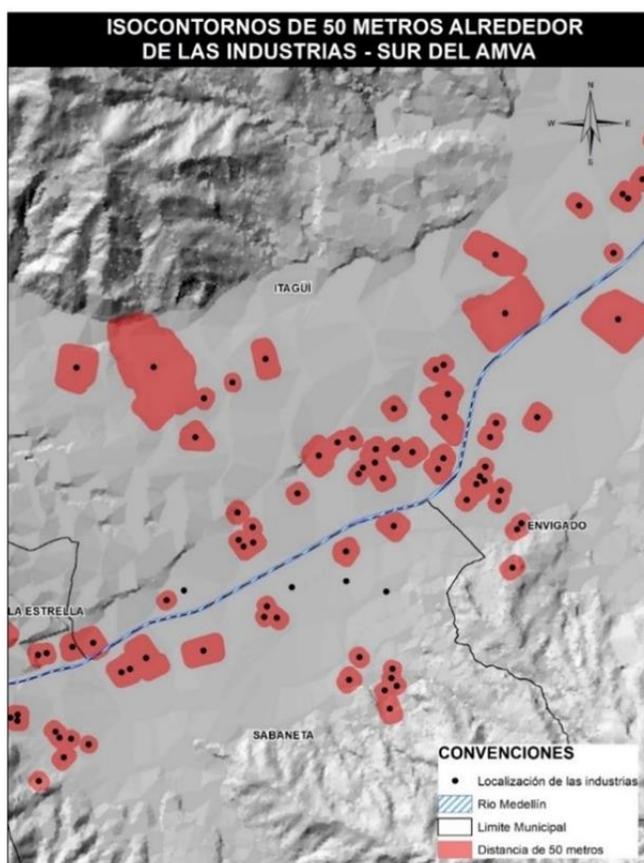


Ilustración 28. Isocontornos de evacuación de 50 m para las instalaciones ubicadas en el Valle de Aburrá

Esta aproximación evidencia el aumento de la condición de riesgo que puede tener la pérdida de contención de las sustancias peligrosas en cada industria y su posible impacto sobre instalaciones vecinas. Para dar cuenta de la posible afectación entre instalaciones por su cercanía dado un evento Natech, se elaboró un mapa indicativo con isocontornos, y se pasaron los polígonos prediales de cada industria a puntos de referencia, de modo que facilitarían la lectura del plano, la Ilustración 28 muestra el resultado de este ejercicio.

Esta primera aproximación permite identificar las instalaciones industriales que, por su cercanía, podrían verse afectadas por la materialización de un evento Natech en instalaciones vecinas. Lo anterior, siempre que los eventos tecnológicos finales tengan un impacto como mínimo a 50 m de los límites físicos exteriores de las instalaciones del MRQ.

Fenómeno Natural

Una amenaza de origen natural bien sea por inundación, avenida torrencial o movimiento en masa, está compuesta por dos componentes principales. El primero, está relacionado con la intensidad del fenómeno natural, asociado con la severidad de su fuerza dinámica. El segundo componente se focaliza en el periodo de ocurrencia del evento, lo que se traduce en el intervalo de tiempo en el que se espera que ocurra uno de estos fenómenos. La combinación de estos componentes define el nivel de amenaza, tal como lo plantean Ancione & Milazzo, (2021) en la Ilustración 29, a manera de ejemplo, para el caso de una

inundación. Cabe resaltar que este enfoque se toma de forma indicativa y como punto de referencia para el planteamiento del índice de vulnerabilidad.

En esta figura se puede observar cómo para una intensidad I se considera una amenaza alta sin importar el tiempo de recurrencia si es superior a 1.25, dado por su potencialidad de daño. También, se observa que, para una intensidad media o baja, la amenaza se puede clasificar como baja, media o alta, dependiendo principalmente de la recurrencia del evento de origen natural. La siguiente expresión se usa para estimar dicha intensidad:

$$I = h(v + 0.5) + DF \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde, h es la altura de la inundación, V es su velocidad y DF es un factor de escombros, siendo este último una relación de la cantidad de sedimentos transportados por la inundación, lo cual puede agravar el nivel de amenaza dependiendo del uso del suelo (i.e., urbano, boscoso o arable).

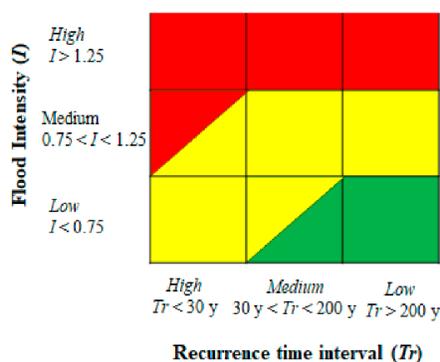


Ilustración 29. Niveles de amenaza por la combinación de intensidad y recurrencia. Color verde – amenaza baja, color amarillo – amenaza media y color rojo- amenaza alta. Tomado de (Ancione & Milazzo, 2021)

La anterior aproximación viene de un análisis de amenaza de inundación para eventos extremos, que fue desarrollado para el Departamento de Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA, por sus siglas en inglés) y para la Agencia Medioambiental del Reino Unido (Kvočka, Falconer, & Bray, 2016). Si bien es una aproximación empírica obtenida a partir de tendencias en registros experimentales y que su factor de escombros no tiene un soporte extenso experimental, ha sido ampliamente utilizado por autoridades regulatorias en el Reino Unido como la DEFRA y en otros países (Foudi, Osés-Eraso, & Tamayo, 2015; Kaźmierczak & Cavan, 2011; Kvočka, Falconer, & Bray, 2016). Esta aproximación se ha considerado como un criterio adecuado para caracterizar la amenaza de inundación sobre personas, al dar unos niveles de amenaza de inundación que pueden ser peligrosos para parte o toda la población, como se observa en la Ilustración 30.

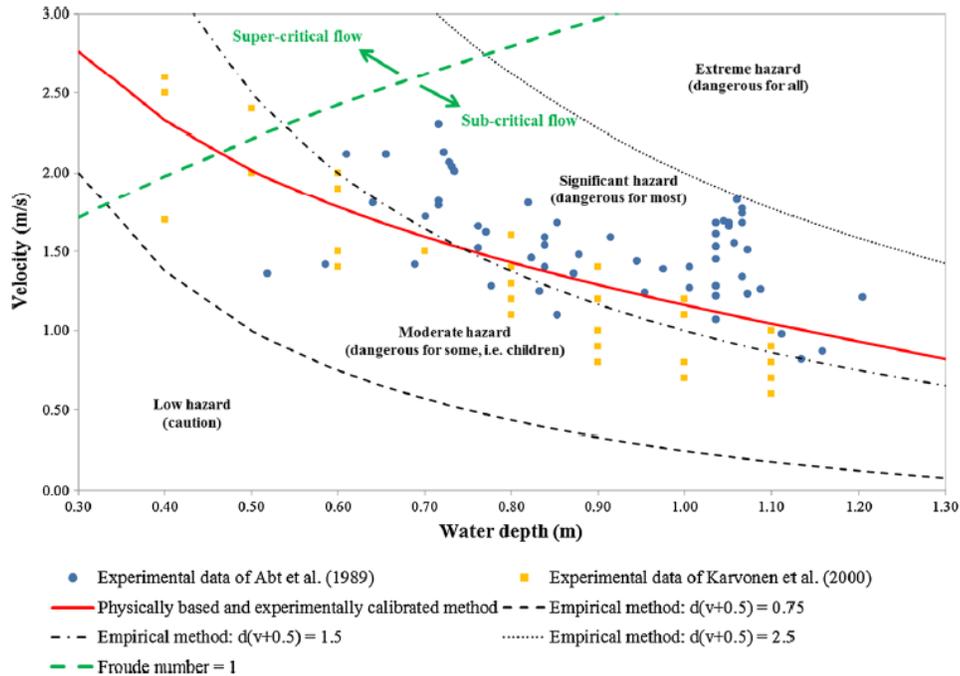


Ilustración 30. Amenaza empírica de inundación. Tomada de (Kvočka, Falconer, & Bray, 2016)

Aproximaciones similares se han reportado a nivel regulatorio en Europa, en donde los mapas de amenaza de inundación contemplan tanto la velocidad como la altura del fenómeno e implementan esta información para categorizar el evento dado un periodo de retorno. De acuerdo con Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E. (2017), a partir de la velocidad del agua se pueden reconocer tres tipologías de inundación: 1) inmersiones lentas, cuando la velocidad del frente de agua es prácticamente despreciable, 2) velocidades bajas, para inundaciones con una velocidad de frente de agua menor o igual a 1 m/s y 3) velocidades altas, para inundaciones con una velocidad de frente de agua mayor a 1 m/s. Estos autores también reconocen la altura del frente de agua y su relación con el daño esperado dada una cierta velocidad. En este sentido reportan: 1) alturas pequeñas menores a 0.5 m, en donde no se espera algún tipo de daño; 2) alturas intermedias, que en conjunto con una velocidad de 1 m/s puede generar daños y 3) alturas del frente de inundación de 1.5m cuando se espera un daño extensivo. Con base en esta clasificación, tomando en cuenta el nivel de recurrencia de este tipo de eventos, y siguiendo lo reportado por la Red de Observación Europea para el Desarrollo y la Cohesión Territorial (ESPON, por sus siglas en inglés), se puede determinar un nivel básico de peligro como el que se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Clasificación del peligro de inundación. Adaptado de (Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E., 2017)

Clasificación de peligro	Altura de inundación (m)	Velocidad de inundación (m/s)	Número de inundaciones observadas/año
Muy bajo	≤ 0.5	≤ 0.2	0
Bajo	$> 0.5 - 1$	$> 0.2 - 0.5$	1 - 3
Moderado	$> 1 - 1.5$	$> 0.5 - 1.0$	4 - 6
Alto	> 1.5	> 1.0	> 7

Sin embargo, si bien es una herramienta usada a nivel mundial, el foco de este proyecto no se centra en la amenaza de la inundación sobre la población directamente. Por el contrario, contempla la potencialidad de una liberación de un material peligroso en una instalación industrial, por lo que una aproximación basada exclusivamente en la afectación del fenómeno a personas puede llegar a ser muy conservadora. Así las cosas, se planteó una aproximación que busca definir valores umbrales que permitan clasificar una intensidad baja, media y alta a partir de un conjunto de simulaciones. En primer lugar, se partió de la revisión de curvas de fragilidad sobre los fenómenos de inundación, las cuales en su mayoría implementan tanques de almacenamiento con daños estructurales de desplazamiento (i.e. flotación y deslizamiento) o pandeo (Ilustración 14). Sobre estos es necesario resaltar que, sin importar el tipo de inundación, ya sea inmersión lenta o con una velocidad lenta o rápida, este tipo de daños estructurales pueden desencadenar fallas en el equipo y una posterior liberación de material peligroso (Villalba, 2017).

La revisión de la literatura permitió identificar el trabajo realizado por Yang, Chen, & Reniers, (2020) en la que a través de simulaciones de Monte Carlo dentro de un marco de análisis de confiabilidad y una regresión de tipo logística, aproximaron la probabilidad de un pandeo o desplazamiento (flotación/deslizamiento) de un tanque atmosférico. Esta probabilidad se determina a partir de la siguiente expresión, la cual depende de un parámetro Φ dependiendo del daño estructural.

$$\mathbb{P}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\Phi(x))} \quad \text{Ec. (13)}$$

Para el caso de un pandeo, los autores obtuvieron la siguiente regresión que depende de parámetros del tanque como su altura (H), diámetro (D), nivel de llenado (φ), densidad del líquido que contiene (ρ_l) y los parámetros de intensidad de la inundación a través de su velocidad (v) y altura (h).

$$\begin{aligned} \Phi(D, H, \varphi, \rho_l, V, h)_{\text{pandeo}} &= 0.009675 D + 0.3826 H + 1.57 V + 3.456 h + 0.6819 \varphi \\ &- 0.003678 \rho_l - 2.611 H \varphi - 0.0005206 H \rho_l - 0.003489 \varphi \rho_l \\ &+ 0.4639 \end{aligned} \quad \text{Ec. (14)}$$

Mientras que para el caso de desplazamiento reportan la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \Phi(D, H, \varphi, \rho_l, V, h)_{desplazamiento} &= 0.7985 H - 0.05644 D + 0.2072 V + 4.803 h + 1.429 \varphi \\ &- 0.00009406 \rho_l + 0.001802 Dh - 4.33H\varphi - 0.001084 H\rho_l \\ &+ 0.6349 Vh - 0.001602 \varphi\rho_l - 5.925 \times 10^{-5} D^2H + 0.0003153 D^2h \\ &- 0.001349 D^2\varphi - 7.899 \times 10^{-7} D^2\rho_l + 0.001512 D^2 + 0.0003177 DV \\ &- 0.00878 DVh + 1.269 \end{aligned} \quad \text{Ec. (15)}$$

A partir de estas ecuaciones se puede estimar la probabilidad de falla de un equipo crítico (en este caso un tanque de almacenamiento) dada la intensidad de la inundación, como se puede observar en la Ilustración 31 para una altura de 0 a 5 m y una velocidad de 0 a 5 m/s.

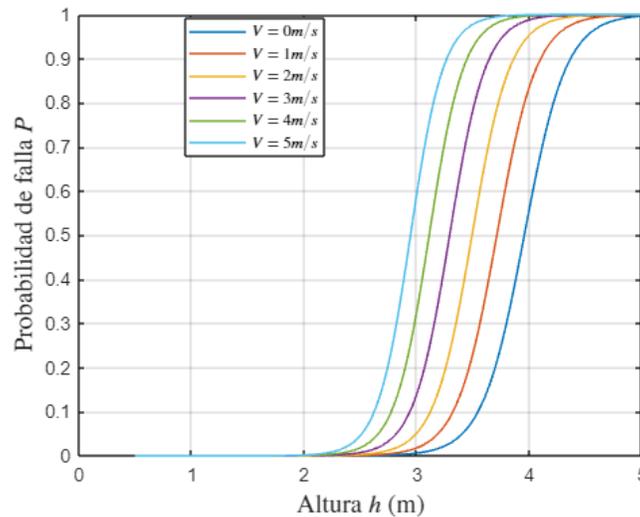


Ilustración 31. Ejemplos de curvas de fragilidad para el desplazamiento de tanques dado una inundación. Información tomada de (Yang, Chen, & Reniers, 2020)

En segundo lugar, se llevó a cabo un ejercicio con simulaciones de Monte Carlo con el fin de determinar diferentes curvas de fragilidad posibles, para una altura de inundación dada. Se usaron valores aleatorios de cada una de las variables descritas en la Tabla 21 y se implementaron en la Ec. (14) y Ec. (15) para estimar la probabilidad de falla de cada una de las combinaciones. Dentro de las variables aleatorias se contemplaron el nivel de llenado del tanque entre el 10% al 80%, la densidad del fluido y una velocidad de inundación entre 0 y 5 m/s, ambos casos siguiendo distribuciones de tipo uniforme. También, se tomaron valores aleatorios dentro de un conjunto de diámetros del tanque reportados por diferentes autores como Yang, Chen, & Reniers (2020) o Landucci et al. (2012) y se implementó una relación entre el diámetro y la altura del tanque ($\frac{D}{H}$) para estimar el valor de la altura dado el diámetro. Para este último caso se hizo un proceso de ajuste con base en los casos reportados en Yang, Chen, & Reniers (2020) y Landucci et al. (2012), truncado a un valor máximo de $\frac{D}{H} = 3$ siguiendo lo mencionado por Zuluaga Mayorga et al. (2019).

Tabla 21. Variables aleatorias implementadas para describir los parámetros de diseño y del fenómeno de inundación

Variable	Distribución	Referencia
Relación de diámetro por altura tanque $\frac{D}{H}$	Lognormal ($\mu = 0.57, \sigma = 0.87$)*	-
Diámetro del tanque D (m)	Discreto	(Zuluaga Mayorga, Sánchez-Silva, Ramírez Olivar, & Muñoz Giraldo, 2019; Yang, Chen, & Reniers, 2020; Landucci, Antonioni, Tugnoli, & Cozzani, 2012)
Nivel de llenado del tanque φ	Uniforme (0.1, 0.8)	(Yang, Chen, & Reniers, 2020)
Velocidad de la inundación V ($\frac{m}{s}$)	Uniforme (0, 5)	(Yang, Chen, & Reniers, 2020)
Densidad de fluido	Normal ($\mu = 810, COV = 0.1$)	-

*Variable truncada en $\frac{D}{H} = 3$

El objetivo es contemplar la incertidumbre de estas variables en términos del cálculo de la probabilidad de falla del equipo y buscar valores umbrales para los cuales una intensidad del fenómeno natural de hV^2 represente una amenaza media o alta. Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso una estrategia iterativa que evalúa diferentes combinaciones de velocidad y altura de la inundación entre 0 a 4 m/s y 0.5 a 4 m, respectivamente. Para cada una de las combinaciones, se llevaron a cabo 1.000 simulaciones de Monte Carlo en las que se implementaron unos valores de densidad, diámetro y altura del tanque, y nivel de llenado, para evaluar la probabilidad de falla (Ilustración 32).

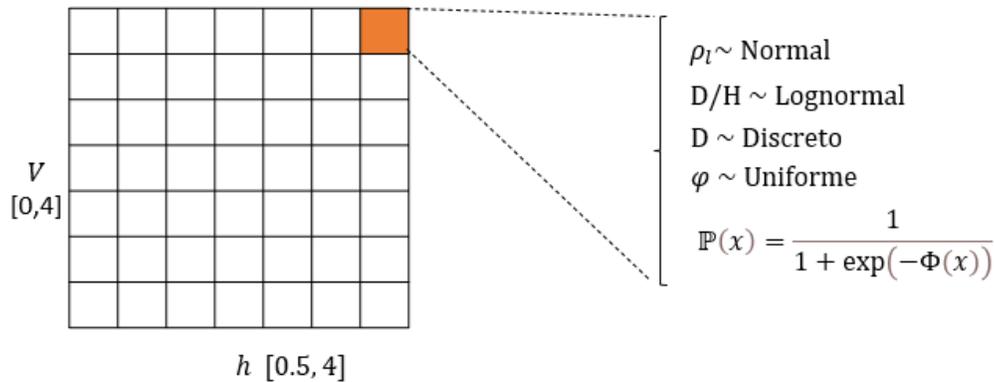


Ilustración 32. Esquema de simulaciones de Monte Carlo usado por cada combinación de velocidad y altura de inundación. Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta que la probabilidad descrita en la Ec. (13) se construyó a partir de una regresión logística que se basa en los dos resultados de una ecuación de estado límite (No falla-0 y falla -1), se contempló que una probabilidad de falla superior a 0.5 era suficiente

para que el sistema fallara. Tomando en cuenta esta aproximación, se determinó, para cada combinación de altura y velocidad de frente de agua, cuántas de las simulaciones fallaban usando la siguiente expresión.

$$\mathbb{P}_f = \frac{\# \text{ Fallas}}{1000} \quad \text{Ec. (16)}$$

Como resultado se obtuvieron las figuras de la Ilustración 33 para los casos de pandeo y de desplazamiento.

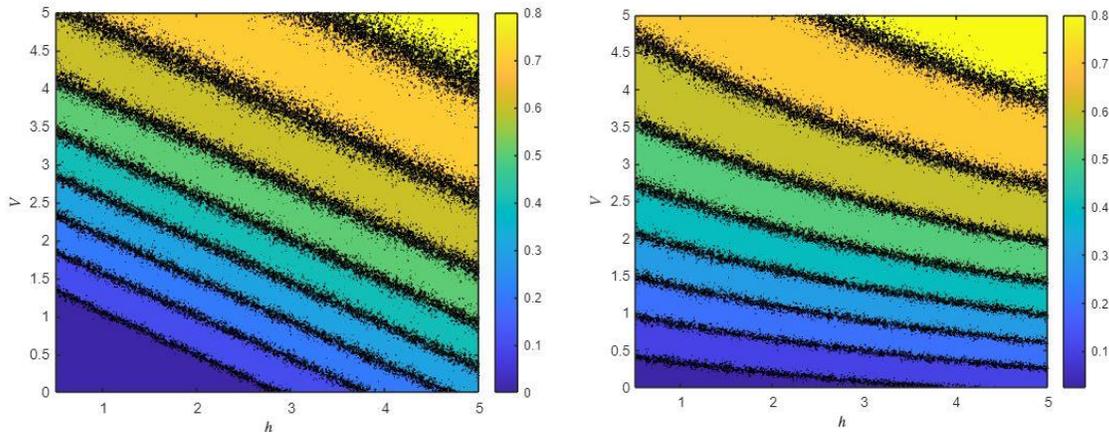


Ilustración 33. Resultados de \mathbb{P}_f para los daños estructurales por pandeo (izquierda) y desplazamiento (derecha)

Estas figuras evidencian que a medida que se aumenta la velocidad y la altura de la inundación, se incrementa la probabilidad de falla en ambos escenarios, con la diferencia de que, el caso de pandeo presenta una tendencia mucho más lineal en comparación con el de desplazamiento, en donde se reconoce una mayor influencia de la altura del frente de agua. Para plantear los umbrales de las intensidades, se contempló el caso de pandeo debido a que se han reportado liberaciones completas y parciales para este caso (Villalba, 2017). Para este propósito se determinaron los “isocontornos de probabilidad” o combinaciones de velocidad y altura en las que se obtenía la misma probabilidad de falla, para luego estimar el hV^2 promedio y de esta manera tener una curva de fragilidad representativa (ver Ilustración 34). Sobre esta curva se contempló:

- Una intensidad baja es aquella que representa una probabilidad de falla menor de 0.1
- Una intensidad media es aquella que representa una probabilidad de falla entre 0.1 y 0.5
- Una intensidad alta es aquella que representa una probabilidad de falla mayor de 0.5.

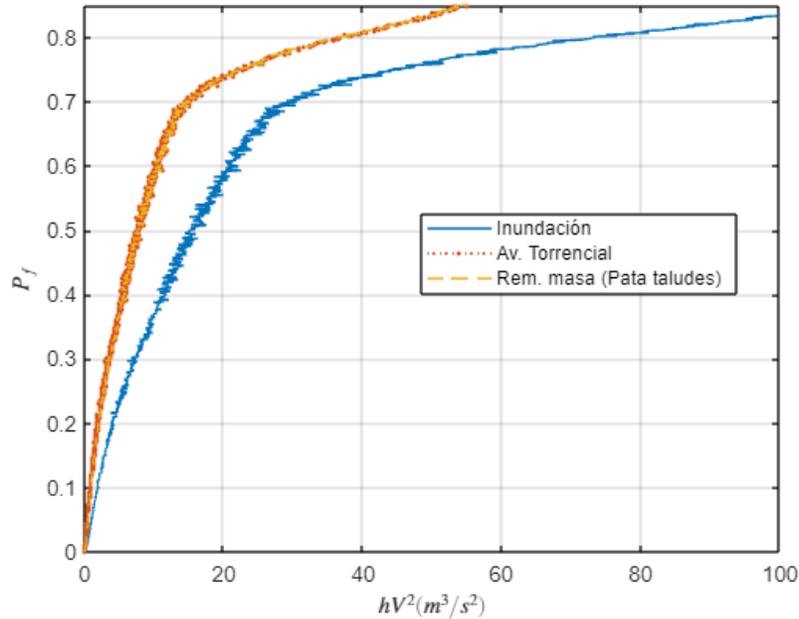


Ilustración 34. Curva de fragilidad con base en los resultados por las simulaciones de Monte Carlo

Así las cosas, se obtuvieron los resultados mostrados en la Ilustración 34 y las siguientes intensidades hV^2 para el fenómeno de inundación:

- Intensidad baja: $hV^2 < 1.66 \frac{m^3}{s^2}$
- Intensidad media: $1.66 \leq hV^2 < 16.13 \frac{m^3}{s^2}$
- Intensidad alta $hV^2 \geq 16.13 \frac{m^3}{s^2}$

Tomando en cuenta esta información y la dinámica de los fenómenos de avenidas torrenciales y movimiento en masa (en pata de taludes), en la que contemplan el flujo de detritos⁴, se estableció que las intensidades baja, media y alta son de la siguiente manera:

- Intensidad baja: $hV^2 < 0.83 \frac{m^3}{s^2}$
- Intensidad media: $0.83 \leq hV^2 < 8.065 \frac{m^3}{s^2}$
- Intensidad alta $hV^2 \geq 8.065 \frac{m^3}{s^2}$

Estas intensidades para avenidas torrenciales y movimiento en masa (en pata de taludes) se tomaron usando un factor modificador a las intensidades reportadas por el fenómeno de inundación de 0.5. Lo anterior como se mencionó en el numeral 4.2.2 debido a que la densidad del material de flujo de escombros presenta un valor medio de 2 ton/m³ (Iverson y Denlinger, 2001; Denlinger e Iverson, 2001; Iverson, 2005, mencionados por Prieto, et al., 2018) otros autores como Iverson (1997) menciona que la densidad de la mezcla suele

⁴ Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas y el lodo es la mezcla de partículas de suelo y agua (UNGRD, 2017)

estar entre 1,8 ton/m³ y 2,4 ton/m³. La Ilustración 34 muestra también las curvas de fragilidad para estos dos casos, tomando los resultados para inundación y el factor mencionado previamente.

Para los movimientos en masa que afecten aquellos elementos ubicados sobre la ladera (sector o zona 2, potencialmente inestable) se trabajará con la confiabilidad y la probabilidad de falla.

Generalmente, en la práctica se acostumbra a definir la estabilidad de un talud de acuerdo al Factor de Seguridad (F.S), el cual se obtiene con un análisis matemático determinístico que considera una relación entre fuerzas y/o momentos, y que tiene en cuenta las diferentes propiedades de los materiales, la geometría de los taludes, la posición del nivel freático y los eventos detonantes, sin embargo, este valor del F.S. depende de la selección de la magnitud de cada uno de los parámetros que intervienen en el método utilizado, y es común que no siempre estos valores de los parámetros (cohesión, fricción, peso específico) sean asumidos de la misma manera por parte de los diferentes profesionales en Geotecnia que puedan realizar un análisis de estabilidad, lo anterior, debido a la incertidumbre que se tiene en la elección de la magnitud de estos parámetros por la naturaleza de heterogeneidad y anisotropía de los materiales.

Todos los ingenieros son conscientes de las dificultades que rodean la frase "Factor de Seguridad". Este concepto es simple y útil: el factor de seguridad es la relación entre el valor permisible de alguna cantidad y el valor calculado o (en algunos casos) medido de esa cantidad (R. V. Whitmann, 1981).

En la actualidad, cada día es más común la inclusión de análisis probabilísticos que tienen en cuenta la variabilidad de los parámetros, y que además de entregar un valor de F.S., se obtenga una desviación de estos valores y una probabilidad de falla, la cual generalmente puede ser obtenida de manera inmediata como resultado directo del uso de cualquier programa de estabilidad utilizado.

En los últimos años se ha observado un rápido crecimiento de la investigación sobre la probabilidad aplicada y un mayor interés en las aplicaciones a la práctica de la ingeniería geotécnica. Desafortunadamente, la probabilidad sigue siendo un misterio para muchos ingenieros, en parte debido a la barrera del idioma y en parte por la falta de ejemplos que muestren cómo se puede utilizar la metodología en el proceso de toma de decisiones. Los análisis de confiabilidad y riesgo son potencialmente más valiosos durante las primeras etapas de un proyecto para orientar la decisión sobre si proceder o no y para ayudar a establecer criterios de diseño. (R. V. Whitmann, 1984).

La teoría de la confiabilidad también ofrece la perspectiva de un método sistemático para seleccionar el factor de seguridad apropiado para alguna aplicación o clase de aplicaciones en particular (R. V. Whitmann, 1981).

Uno de los modelos de confiabilidad más utilizados en la geotecnia es el método de Monte Carlo, FOSM y estimativas puntuales (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011), proponiendo como alternativa para este análisis el método estadístico FOSM, sin embargo, es posible utilizar otros métodos siempre y cuando sean debidamente justificados. A continuación, se presenta la descripción de este modelo.

Modelo FOSM (First Order Second Moment)

El método FOSM, primer Orden segundo Momento, viene siendo utilizado de manera continua para determinar la confiabilidad de los taludes frente a la falla, “como es de esperarse, el uso de métodos de confiabilidad no garantiza totalmente que no se produzcan fallas, pero su uso riguroso y metódico sí puede permitir que el ingeniero esté seguro de que los factores que se conocen y se pueden controlar no influirán sustancialmente en esas fallas”. (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011)

Para la determinación de la confiabilidad, se usa el denominado índice de confiabilidad, β , del factor de seguridad (F.S.), definido como:

$$\beta I = \frac{E[FS]-1}{\sigma[FS]}$$

Donde $E[FS]$ es el valor esperado del factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes y $\sigma[FS]$ es la desviación estándar del factor de seguridad, teniendo como el FS crítico el valor igual a 1. Este índice expresa la confiabilidad de FS en relación con la probabilidad de falla o ruptura.

Es claro que para que esta ecuación sea usada considerando una distribución de probabilidad normal para el factor de seguridad, las distribuciones de la resistencia del suelo o de la roca y de las cargas aplicadas también deben serlo. (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011).

El índice de confiabilidad indica el número de desviaciones estándar que distancian la ruptura del factor de seguridad encontrado. El valor de β complementa el valor del factor de seguridad y permite estimar la probabilidad de ruptura. Este índice puede ser relacionado con la probabilidad de ruptura, $P[R]$, siempre y cuando se conozca la forma de la distribución del factor de seguridad. La Ilustración 35 muestra la relación entre β y $P[R]$ para el caso de la distribución normal (Gaussiana) del factor de seguridad (Assis, 2002).

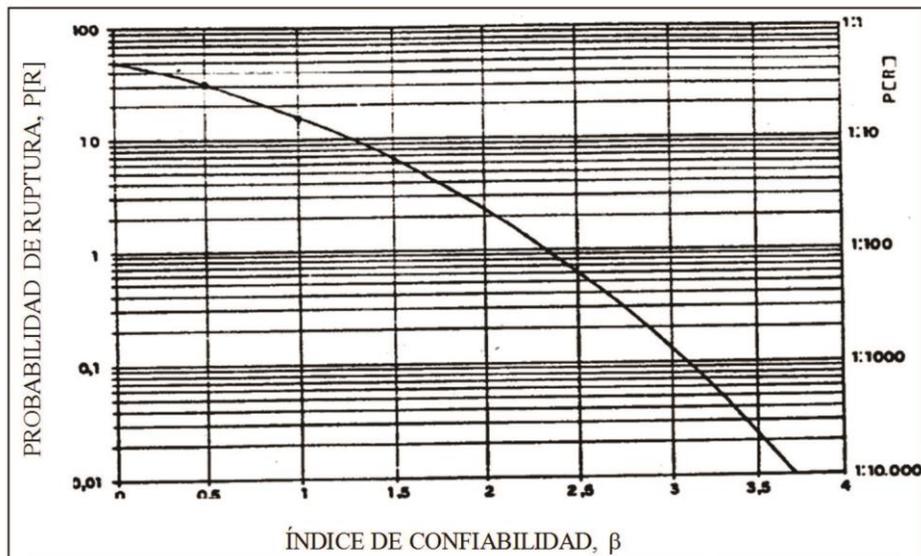


Ilustración 35. Relación entre β y $P[R]$ para la distribución normal, del Factor de Seguridad (Assis, 2002- tomado de Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011)

Encontrando que para valores de $\beta=0$, la probabilidad de ruptura es del 50%, y para valores cercanos a $\beta=1.2$ estos se encuentran alrededor del 10%.

Una de las principales dificultades a la hora de hacer análisis de confiabilidad está en definir los niveles de seguridad aceptables, es decir, cuál es la probabilidad de falla máxima que se puede tolerar para una estructura. Actualmente no existe un consenso sobre cuál es este valor de referencia, y son pocas las propuestas presentadas en las cuales se definen límites de decisión. En este sentido, la propuesta más conocida es la presentada por USACE para niveles del índice de confiabilidad β y la probabilidad de ruptura ($P[r]$) o de falla asociada, como se muestra en la Tabla 22 (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011).

Tabla 22. Índices de confiabilidad objetivo y probabilidades de falla admisibles

Nivel de desempeño esperado	b	$P[r]$
Alto	5	3×10^{-7}
Bueno	4	3×10^{-5}
Arriba del promedio	3	10^{-3}
Abajo del promedio	2.5	6×10^{-3}
Pobre	2.0	2.3×10^{-2}
Insatisfactorio	1.5	7×10^{-2}
Peligroso	1.0	1.6×10^{-1}

Fuente: (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011)

Como se observa en la Tabla 22 con este criterio la probabilidad de falla crítica es del orden de 6×10^{-3} , que equivale a un índice de confiabilidad de 2.5, por lo cual se espera que estructuras con índices de confiabilidad superiores a 2.5 presenten un desempeño por encima del promedio y se presenta como peligrosos índices por debajo de 1.0 con una probabilidad de falla crítica del orden de 1.6×10^{-1} .

Con base en lo expuesto anteriormente, y con base en los resultados presentados en los ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN LOS MUNICIPIOS DE CALDAS, LA ESTRELLA, ENVIGADO, ITAGÜÍ, BELLO, COPACABANA Y BARBOSA, PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL, en donde se presentan los resultados del Índice de Confiabilidad para los escenarios de lluvia, especificados en dicho estudio. La clasificación de estos mapas según el valor del índice de confiabilidad, se ajusta a la propuesta dada por USACE (1999), la cual asigna un nivel de desempeño esperado según el índice de confiabilidad y probabilidad de falla, en el cual $\beta=1,0$ se cataloga como un nivel de desempeño peligroso y $\beta=2,5$ es un nivel de desempeño abajo del promedio, asociado a una probabilidad de falla de $1,5 \times 10^{-2}$ de que el factor de seguridad por movimientos en masa tipo planar sea menor que 1, teniendo en cuenta las incertidumbres que aporta cada parámetro (Hidalgo & Pacheco de Assis, 2011).

De acuerdo con Martínez Montes et al (2007), en cuanto a umbrales de aceptación del riesgo, existen publicaciones que vinculan estos a la actitud y aceptación por parte de los individuos y de la sociedad de manera que a partir del riesgo de muerte por persona y año por exposición la actitud queda perfectamente determinada.

Tabla 23. Actitudes hacia el riesgo (tomado de Martínez Montes, et al 2007)

Riesgo de muerte por persona y por año	Actitud
10^{-3}	Ese tipo de riesgo no es común. Es inaceptable para el público y cuando aparece la sociedad demanda medidas
10^{-4}	Se está dispuesto a asignar recursos para reducir el riesgo (como por ejemplo limitación de paso de mercancías peligrosas)
10^{-5}	Si bien son algo menores que los anteriores, aún son reconocidos como tales (riesgos por envenenamiento, fuego, etc)
10^{-6}	No son prácticamente reconocidos como tales. Se es consciente del mismo pero no se estima pueda ocurrirle a uno mismo (este es el caso de electrocución por rayo, etc)

Tomando en lo anterior, se estableció que las intensidades baja, media y alta son de la siguiente manera de acuerdo a la confiabilidad β :

- Intensidad baja: $\beta > 2.5$
- Intensidad media: $0.5 < \beta < 2.5$
- Intensidad alta $\beta \leq 0.5$

Una vez se determinan las intensidades de la amenaza, se procede a clasificar la misma mediante el uso de una matriz. La clasificación de la amenaza se hace a través de la matriz que contiene en sus filas la intensidad del fenómeno y en sus columnas los periodos de retorno. El paso inmediatamente posterior es determinar en la matriz, el nivel de amenaza según el cruce de la información contemplada (intensidad y periodo de retorno). En el caso en que no se tengan diferentes periodos de retorno para la amenaza analizada, se plantea una relación directa con los niveles de intensidad. Es decir que, si se tiene una intensidad alta, se tendrá una amenaza alta, y si se tiene una intensidad media, se tendrá un nivel de amenaza medio. Por lo tanto, como resultado de este proceso, se obtiene el nivel de amenaza en términos cualitativos, ya sea una amenaza alta, media o baja.

Esta información se utiliza posteriormente para asociarla a la posible liberación o pérdida de contención de las sustancias peligrosas presentes en la instalación industrial bajo análisis. Determinada esta última por su ubicación dentro de la mancha de amenaza de origen natural y por el nivel de la misma, determinada en el paso anterior. Este paso permite establecer si se tendrá una liberación completa, parcial o no habrá liberación, tal como se describe en la siguiente sección. Cabe resaltar que, siguiendo las ramificaciones del árbol de sucesos de la Ilustración 36, es posible tener una estimación del porcentaje de material liberado, en donde los porcentajes de las cantidades liberadas se determinan a partir de una potencialidad de liberación de acuerdo con la intensidad de la amenaza.

Susceptibilidad del equipo y falla de su integridad

Con respecto a la susceptibilidad a fallar del equipo, se asume que la instalación debe estar expuesta a la mancha del evento natural y además estar en una ubicación con una amenaza media o alta. Como se mencionó previamente, la amenaza tiene dos componentes: la intensidad o fuerza dinámica con potencial de daño y la recurrencia del evento. Con base en lo reportado por Ancione & Milazzo, (2021), se contempla que:

- Una amenaza media conlleva a una liberación parcial del material más peligroso
- Una amenaza alta conlleva a una liberación total del material más peligroso

Esta suposición se basa en la imposibilidad de evaluar la probabilidad de falla de todos los diferentes equipos, el desconocimiento sobre el volumen y capacidad de cada uno de estos, y el desconocimiento sobre la distribución de la planta. Esta aproximación plantea el peor escenario al focalizarse sobre la sumatoria del inventario de las sustancias químicas peligrosas presentes en la instalación.

Por lo tanto, tomando en cuenta la aproximación de Ancione & Milazzo (2021) de la Ilustración 29, se propuso el árbol lógico mostrado en la Ilustración 36 que incluye tanto, nodos de decisión como de tipo aleatorio. En primer lugar, para el caso de un fenómeno natural de inundación, avenida torrencial o movimiento en masa, se clasifica el tipo de liberación según una intensidad alta, media o baja. En caso de que sea una intensidad alta, se asume que representa una amenaza alta y por ende la liberación es completa. Si hay una intensidad media, tiene una probabilidad de 0.167 de tener una amenaza alta y 0.833 de una amenaza media, lo cual desencadena en una liberación total o parcial, respectivamente. Finalmente, se contempla que dada una intensidad baja hay una probabilidad de 0.5 de tener una amenaza baja, en cuyo caso no habría una liberación y de 0.5 de una amenaza media con una liberación parcial.

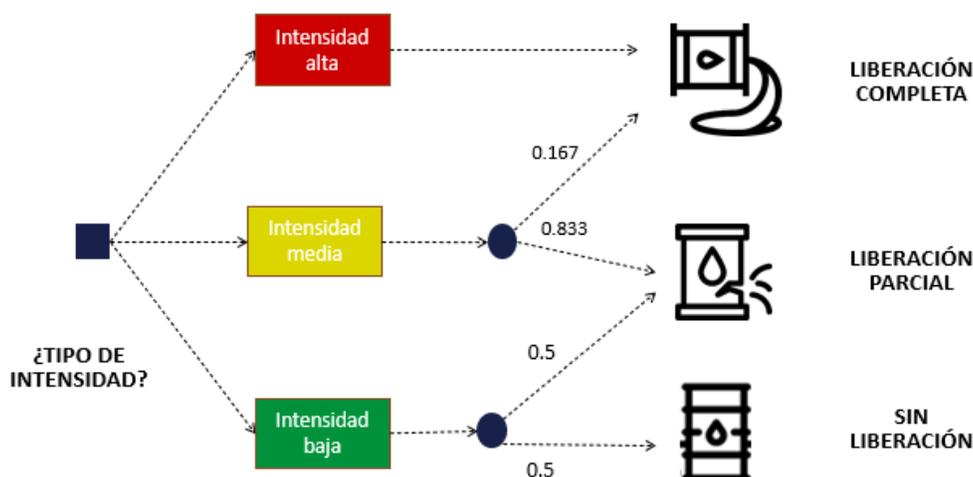


Ilustración 36. Árbol lógico de decisión sobre la susceptibilidad del equipo a fallar y provocar una pérdida de contención. Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que esto hace parte del índice de vulnerabilidad, pero que es necesario un nivel de detalle mucho mayor para definir las probabilidades finales de falla y de liberación de material, conociendo las particularidades no solo de los equipos sino también de las barreras preventivas y mitigativas disponibles. Por lo tanto, estos valores indicativos deben pensarse en ese marco de análisis.

Potencial de pérdida de contención

Una vez determinado el porcentaje de posible material liberado, se determina el inventario de las sustancias químicas peligrosas presentes en la instalación, de manera que se pueda categorizar su volumen. Para ello, se toma el nivel de inventario máximo disponible en los formatos de recolección de información utilizados en las visitas a las instalaciones industriales del Valle de Aburrá, se sugiere tomar este valor, de manera que se adopte una postura conservadora. Si no está disponible la información previamente mencionada para la sustancia química peligrosa analizada, se sugiere tomar la siguiente sustancia y hacer todo el proceso descrito previamente. Como resultado del mismo, se puede determinar un volumen de potencial liberación de las sustancias presentes en la instalación mediante la expresión de la Ec. (17).

$$v = \%liberación * \sum_{i=1}^n Q_j \quad \text{Ec. (17)}$$

Este valor posteriormente se normaliza y se obtienen valores de v^* que varían de 0 a 1, los cuales se categorizan posteriormente en 5 categorías de volúmenes, de la siguiente forma:

- 1) Volumen Menor de 0 - 0.2,
- 2) Volumen Intermedio menor de 0.2 – 0.4,
- 3) Volumen Intermedio de 0.4 – 0.6,
- 4) Volumen Intermedio mayor de 0.6 – 0.8 y
- 5) Volumen Mayor de 0.8 – 1.

Como se observa, el resultado del índice de vulnerabilidad Natech busca determinar si se puede o no tener una liberación de material peligroso dada la ocurrencia de un fenómeno natural. Posteriormente, dada esa liberación, se conciben los posibles impactos sobre el entorno al considerar la peligrosidad industrial.

Finalmente, una vez se conoce el posible escenario de liberación de una sustancia peligrosa, se debe reconocer la presencia de instalaciones que se encuentran cercanas entre sí y que pueden estar sujetas a una intensidad similar del fenómeno natural, por lo que el potencial de liberación de material peligroso a su alrededor puede incrementar de forma significativa. Esta aproximación se aborda al contemplar la densidad industrial. Detalles sobre la metodología se presentan en la sección 7.1.

Finalmente, una vez construida la estructura del índice de vulnerabilidad de riesgo Natech, la metodología podrá enfocarse en la condición de riesgo que contempla los posibles impactos de las liberaciones de sustancias peligrosas sobre el territorio. Por lo tanto, la condición de riesgo deberá considerar los blancos de afectación, como por ejemplo

población cercana, ecosistemas e infraestructura crítica (equipamientos) cercana como hospitales y colegios, entre otros. De esta forma, el índice de vulnerabilidad constituye un insumo importante que, en conjunto con la peligrosidad de las sustancias, de equipos de proceso y la densidad industrial, permitirán determinar la peligrosidad industrial que constituye el input para estimar la condición de riesgo Natech en las diferentes zonas de los municipios ubicados en el Valle de Aburrá.

6.6 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN NATECH

A partir de los criterios de calificación definidos por Milazzo y Ancione (2021), quienes consideran la densidad poblacional y el tipo de ocupación de los equipamientos categorizando la presencia de población entre residentes, trabajadores, estudiantes y personal que permanece en hospitales y su vulnerabilidad ante un evento Natech; estos se ajustan considerando los usos actuales del suelo, la clasificación del suelo y los equipamientos según los Planes de Ordenamiento Territorial POT vigentes que aportan esta información en la cartografía protocolizada de cada municipio.

Los usos actuales del suelo y los equipamientos permiten inferir la permanencia de la población, mientras que la clasificación del suelo aporta elementos que ayudan a deducir el tipo de actividad que se desarrolla y la densidad poblacional asociada.

En la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26 se presentan las calificaciones dadas para cada categoría del uso actual del suelo, la clasificación del suelo y los equipamientos, donde los valores más altos se interpretan como las categorías con mayor exposición ante un evento Natech.

Tabla 24. Calificaciones asignadas a las categorías de usos actuales del suelo – POT.

Uso actual del suelo	Calificación
Residencial	9
Industrial	3
Comercial	7
Servicios	7
Mixto	5
Agropecuario	1
Forestal	1
Minero	1
Otros	1

Tabla 25. Calificaciones asignadas a las categorías de clasificación del suelo – POT.

Clasificación del suelo	Calificación
Urbano	9
Expansión	1
Rural - Rural	1
Rural - Corredor vial	3
Rural - Suburbano	5
Rural - Campestre	5
Rural - Centro poblado	7

Tabla 26. Calificaciones asignadas a las categorías de equipamientos – POT.

Equipamientos	Calificación
Salud	9
Educación	7
Seguridad	7
Culto	3
Recreación - Deporte	3
Comercial	5
Servicios públicos	3
Sociales	5
Institucional	5

Una vez asignadas las calificaciones en la información cartográfica en formato shapefile correspondientes, se llevan a formato raster y se realiza una suma a través de las herramientas SIG para el álgebra de mapas, con el cual se obtiene el índice de exposición ante un evento Natech, como se muestra a manera de ejemplo en la Ilustración 37.

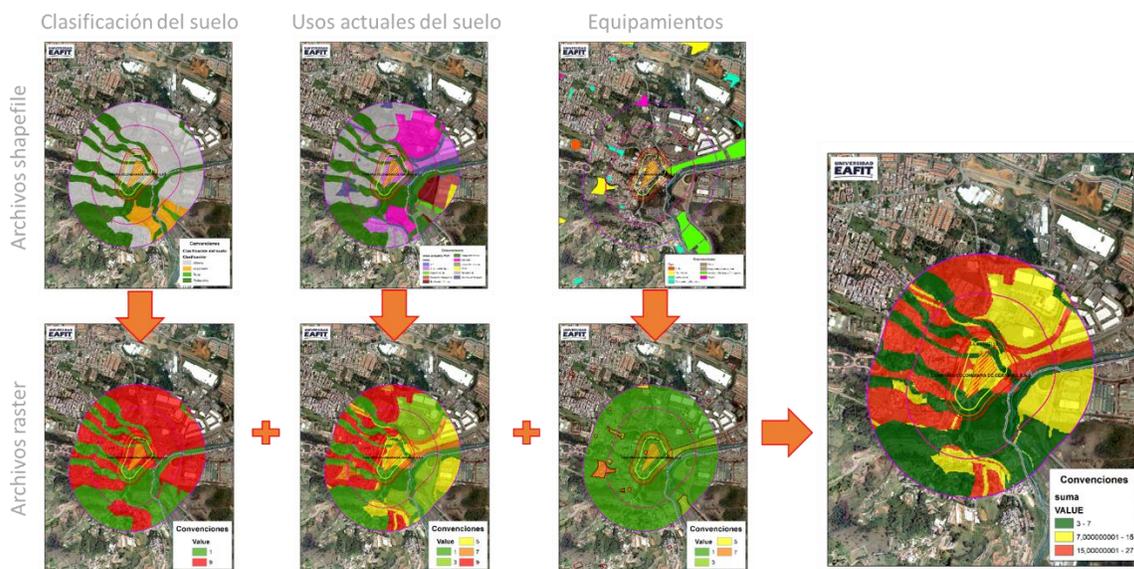


Ilustración 37 Procedimiento cartográfico para la definición del índice de exposición.

6.7 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN DE RIESGO NATECH

De acuerdo con el planteamiento anterior, el índice de vulnerabilidad constituye uno de los insumos para determinar la condición de riesgo Natech a través del índice de peligrosidad. Dicha condición de riesgo se describe completamente a partir de este índice de peligrosidad industrial y el nivel de potencial exposición de las infraestructuras y comunidades vecinas. Bajo esta óptica, también se conciben elementos como el uso del suelo y los equipamientos que pueden verse potencialmente afectados por la materialización de un evento Natech. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea una metodología general para la estimación de la condición de riesgo, partiendo de la siguiente expresión (Ilustración 38):



Ilustración 38. Metodología general para la estimación de condición de riesgo

Es claro que para el índice de vulnerabilidad se ha planteado una metodología, descrita en la sección 6.5, bajo la cual se determinan:

1. El nivel de intensidad del fenómeno natural (inundación, avenida torrencial y movimientos en masa)
2. Se clasifica y determina el nivel de amenaza de acuerdo con su relación en términos del nivel de intensidad y el periodo de retorno
3. Se determina un volumen normalizado de liberación para cada instalación bajo análisis

Es así como, el siguiente paso para determinar otro de los elementos que nutren a la condición de riesgo es la estimación de la peligrosidad industrial. Para ello es necesario considerar la cuantificación de la densidad industrial, el nivel de inventario de las sustancias peligrosas y la peligrosidad de los equipos. Los detalles metodológicos pueden consultarse en la sección 7.

Por lo tanto, la condición de riesgo contempla información asociada al nivel de peligrosidad de las sustancias químicas presentes en las instalaciones del MRQ, el nivel de peligrosidad de los equipos por instalación, el índice de vulnerabilidad, y finalmente, la localización de las instalaciones, asociada a su proximidad con instalaciones industriales vecinas y los posibles efectos dominó que puedan generarse.

Por otra parte, para cuantificar la densidad industrial se considera el número de instalaciones industriales presentes en un radio determinado, por ejemplo, 50 m, 100 m, 150m y 300m. Para este caso, se hace una normalización del número de instalaciones presentes a diferentes distancias, de manera que se contemple la proximidad de las instalaciones y su posible afectación por la propagación de los eventos tecnológicos desencadenados por el fenómeno natural.

Además, para nutrir el índice de peligrosidad industrial, se considera la peligrosidad de las sustancias presentes en la instalación bajo análisis, su nivel de inventario y el umbral máximo, información suministrada por el MRQ en donde nuevamente se hace una normalización de las cantidades de las sustancias. Adicionalmente, se considera la peligrosidad de los equipos de proceso contemplados en el MRQ. Lo anterior, al sumar el número de equipos con diferentes niveles de peligrosidad, multiplicados por un factor que varía de 0.2 a 1. Este factor permite darles mayor relevancia a los equipos con un nivel de peligrosidad mayor.

Finalmente, se calcula el índice de peligrosidad industrial al sumar cada uno de los elementos previamente descritos, multiplicados por un peso que se determina al implementar el proceso analítico jerárquico mediante la escala de Saaty, los detalles de su aplicación se describen en la sección 7.2. Esta última permite determinar, por criterio experto, la relevancia de los cuatro elementos que componen el índice de peligrosidad industrial.

7. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DE LA CONDICIÓN DE RIESGO NATECH

7.1 PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN: PASO A PASO

El índice busca identificar cuáles empresas en el Valle de Aburrá tienen la potencialidad de generar una condición de riesgo que requiera análisis más detallados tras la ocurrencia de un fenómeno de origen natural de inundación, avenida torrencial o movimiento en masa. Este índice se construye a partir de información disponible principalmente en el Mapa de Riesgo Químico (MRQ) como el inventario de sustancias químicas peligrosas, inventario de equipos peligrosos y la ubicación georreferenciada de las empresas, pero parte también de información sobre el nivel de intensidad o amenaza de los fenómenos naturales, así como de características propias del territorio. Tal como se muestra en la Ilustración 39 el índice de condición de riesgo se obtiene a partir de un índice de peligrosidad industrial y un nivel potencial de exposición. Para el primer caso, es un índice que contempla el nivel de peligrosidad de la empresa en cuanto a sus equipos, sustancias químicas peligrosas, nivel de vulnerabilidad y su densidad industrial. Por su parte el nivel potencial de exposición corresponde a posibles blancos afectados en una distancia determinada dada una liberación de una sustancia peligrosa. Para ello, se contempla información reportada en el POT y en los planes de gestión municipal como la clasificación del suelo, su uso actual y los equipamientos o infraestructura sensible. A continuación, se explica cada uno de estos elementos en términos de la información que se necesita, el resultado y el paso a paso del cálculo.

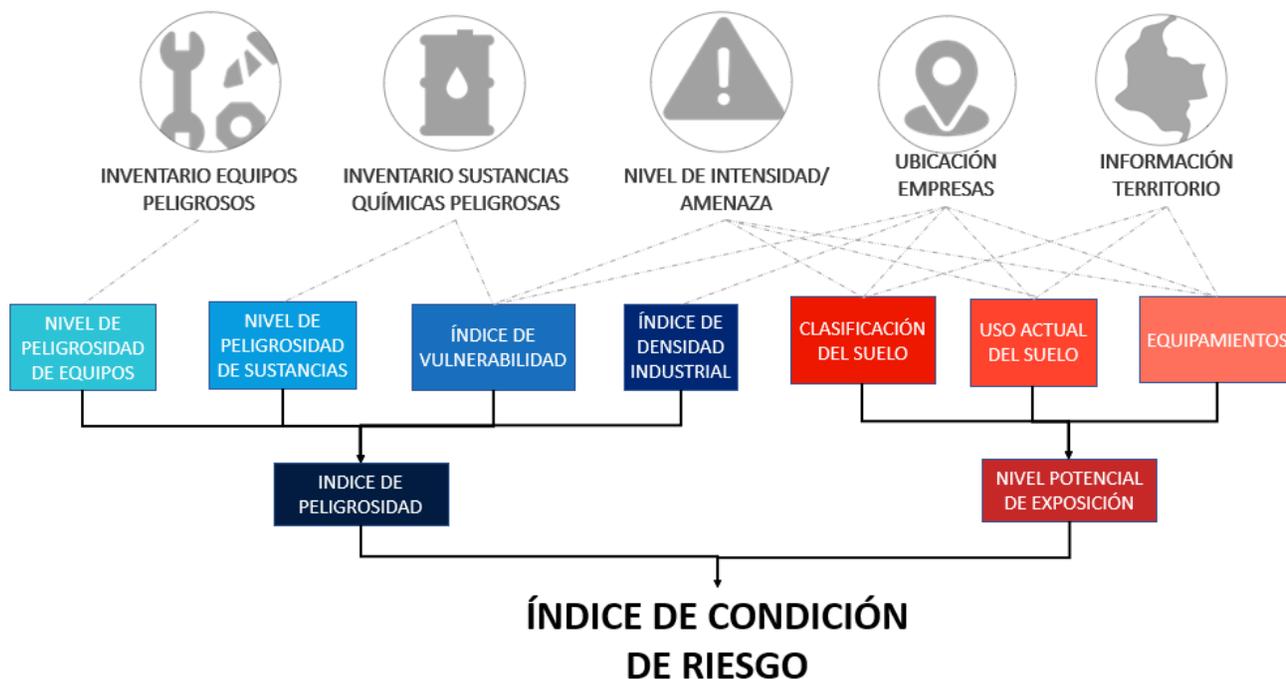


Ilustración 39 Esquema lógico del índice de condición de riesgo Natech

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

¿Qué necesita?

Mapa de intensidades o amenaza del fenómeno de origen natural (inundación, movimiento en masa o avenida torrencial), ubicación de las empresas y el inventario de las sustancias químicas peligrosas reportado en el MRQ.

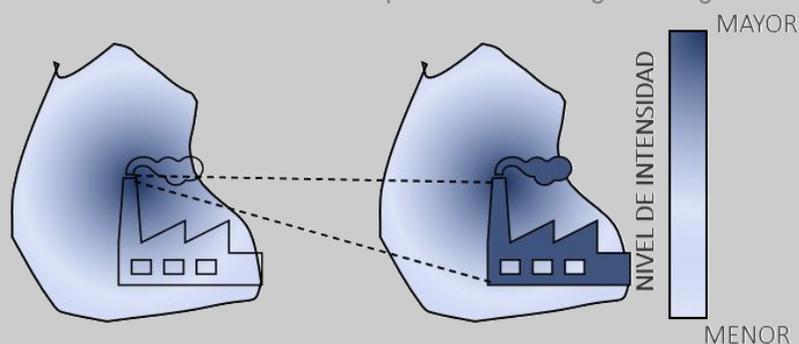
¿Qué obtenemos?

Un indicador que ordena las empresas de acuerdo con su potencial de liberación de las sustancias químicas peligrosas que contiene cada instalación industrial, dado un fenómeno de inundación, avenida torrencial o movimiento en masa

¿Cómo se calcula?

Para calcular el índice de vulnerabilidad siga los siguientes pasos. Estos se deben realizar para CADA una de las empresas a evaluar (representada con el subíndice *i*):

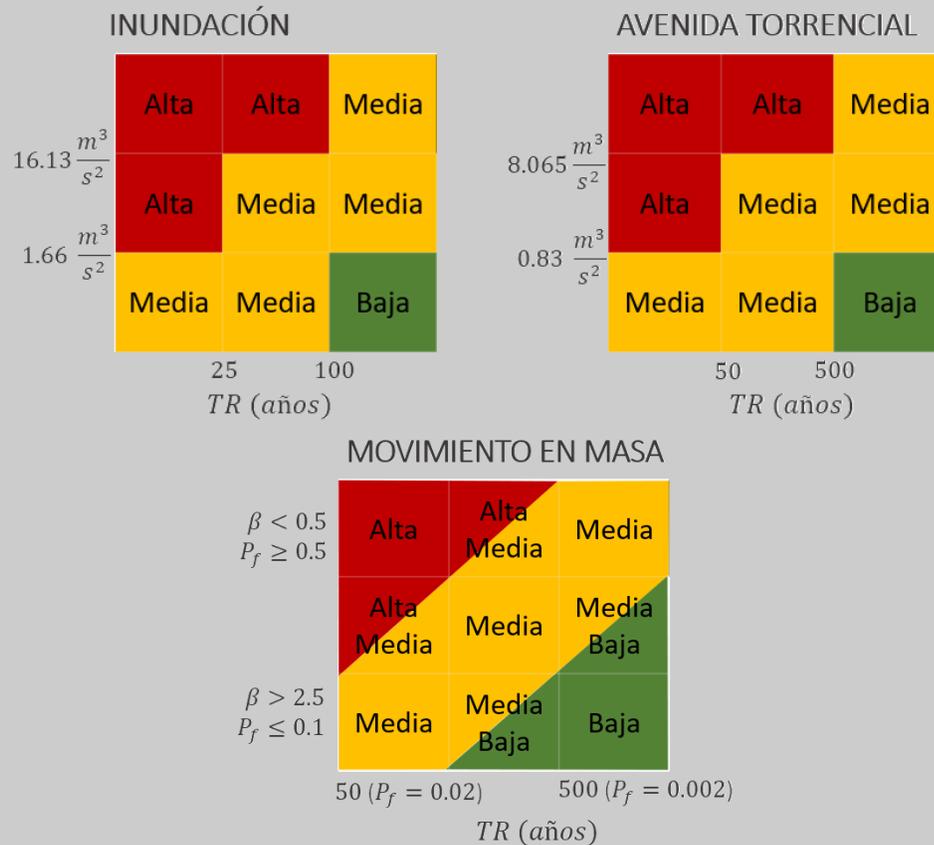
1. Determine el nivel de intensidad del fenómeno de origen natural (inundación, avenida torrencial o **movimiento en masa**) dada la ubicación y extensión de la empresa. Considere los siguientes elementos.
 - a. Implemente un mapa de intensidad para inundación o avenida torrencial de flujo de momento (hV^2), donde *h* es la altura y *V* la velocidad máxima del frente de la inundación.
 - b. Implemente un mapa de estabilidad siguiendo lo reportado por el SGC en su guía metodológica de zonas de exposición de los elementos ante un deslizamiento, focalizándose en las Zona 2 (potencialmente inestable) y Zona 3 (depósitos de material deslizado).
 - c. El polígono de la empresa puede tener diferentes niveles de intensidades, dependiendo de su extensión y ubicación. Debido a que no se tiene información de la posición exacta de los equipos y para ser conservadores, considere la mayor intensidad obtenida como se esquematiza en la siguiente figura.



2. Clasifique el nivel de intensidad del fenómeno natural
 - a. Para el caso de inundación contemple los siguientes umbrales:
 - i. Intensidad baja: $hV^2 < 1.66$
 - ii. Intensidad media: $1.66 \leq hV^2 < 16.13$
 - iii. Intensidad alta $hV^2 \geq 16.13$
 - b. Para el caso de avenida torrencial y movimiento en masa (run out o en la pata del talud), considere los siguientes umbrales

- i. Intensidad baja: $hV^2 < 0.83$
 - ii. Intensidad media: $0.83 \leq hV^2 < 8.065$
 - iii. Intensidad alta $hV^2 \geq 8.065$
- c. Para el caso de movimientos en masa en la zona 2, de acuerdo al valor de confiabilidad β
- i. Intensidad baja: $\beta > 2.5$
 - ii. Intensidad media: $0.5 < \beta \leq 2.5$
 - iii. Intensidad alta: $\beta \leq 0.5$

3. Determine el nivel de amenaza dependiendo del nivel de intensidad y el periodo de retorno de la información implementada, para ello contemple las siguientes matrices de decisión. Se tiene una matriz similar para el caso de movimiento en masa dependiendo de un nivel de confiabilidad.



NOTA: Si se desconoce el periodo de retorno y:

4. se considera tan remoto como un sismo, determine el nivel de amenaza a partir del nivel de intensidad: alta-alta, media-media y baja-baja.
5. En caso contrario, considere que una intensidad baja tiene el 50% de representar una amenaza baja o 50% de media. Una intensidad media tiene una probabilidad de una amenaza media en el 83.3% y del 16.7% de una amenaza alta. Finalmente, una intensidad alta representa siempre una amenaza alta.
6. Determine el potencial de afectación de la empresa

- a. Considere una afectación en los equipos de proceso para amenazas media o alta.
 - b. Asuma que una amenaza baja no conlleva a una pérdida de contención, una amenaza media a una pérdida parcial del 50% y una amenaza alta a una pérdida total (100%).
7. Determine el potencial de liberación de las sustancias peligrosas de la empresa
- a. Determine el inventario total (sumatoria) de las sustancias químicas bien sea por:
 - i. Valor máximo reportado en el MRQ
 - ii. Umbral máximo dependiendo de la categoría menor, intermedio o mayor.

NOTA: La suma debe realizarse sobre la misma unidad de medición, en este caso tonelada, según lo reportado por el MRQ. Si no se encuentra disponible un valor numérico ni categórico reportado en el MRQ para una sustancia, se debe actualizar la información con la empresa correspondiente.

- b. Estime el potencial de liberación, usando el potencial de afectación y el nivel de inventario con la siguiente fórmula:

$$V_i = Q^i * A_f^i$$

Donde Q^i es el nivel de inventario obtenido en el paso 5a para la industria i-ésima y A_f^i es el nivel de afectación dependiendo del nivel de amenaza en el paso 3 y 4.

NOTA: Si se desconoce el periodo de retorno y se consideran las probabilidades de la nota del punto 3, use el siguiente valor de A_f^i dependiendo del nivel de intensidad: 25% baja, 58.35% media o 100% alta, correspondientes a los valores esperados de liberación.

8. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor potencial de liberación de sustancia química peligrosa) a 1 (empresa con mayor liberación) con la siguiente normalización

$$V_{in} = \frac{V_i - \min(V)}{\max(V) - \min(V)}$$

Donde $\min(V)$ y $\max(V)$ es el mínimo y el máximo potencial de liberación de las empresas evaluadas.

ÍNDICE DE DENSIDAD INDUSTRIAL

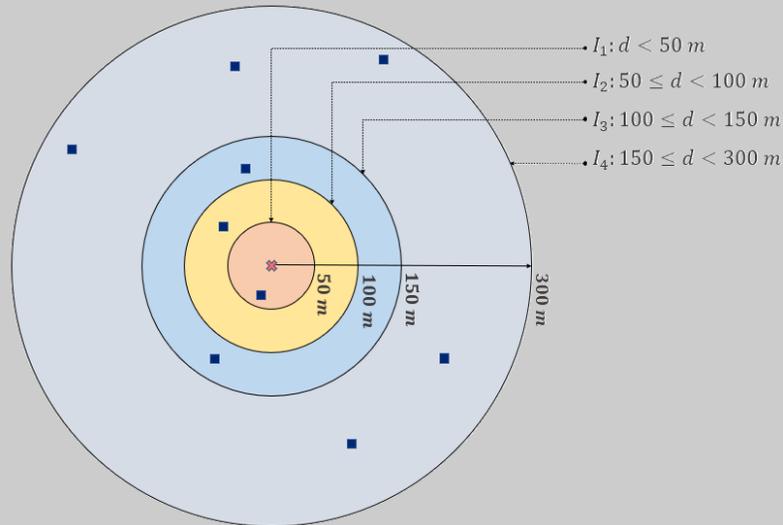
¿Qué necesita?
La localización (polígonos) y tamaño de las industrias por evaluar
¿Qué obtenemos?
Un indicador que ordena las empresas de acuerdo con la distancia a otras industrias en el Área Metropolitana
¿Cómo se calcula?

Para calcular el índice de densidad industrial siga los siguientes pasos:

1. Se determina Un Buffer de 50 metros alrededor de la industria
2. Se determina cuántas empresas tocan el buffer de cada instalación
3. Se repite el procedimiento para 100, 150 y 300 m.
4. Se estima el índice de densidad industrial de cada empresa usando la siguiente expresión:

$$I_{den} = \frac{I_1}{50} + \frac{I_2}{100} + \frac{I_3}{150} + \frac{I_4}{300}$$

Donde I_1, I_2, I_3 y I_4 son el número de empresa en las zonas 1 a 4, tal como se muestra en la siguiente figura (representadas como cuadrados).



5. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor resultado) a 1 (empresa con mayor resultado) con la siguiente normalización

$$I_n = \frac{I_{den} - \min(I_{den})}{\max(I_{den}) - \min(I_{den})}$$

Donde $\min(I_{den})$ y $\max(I_{den})$ son el mínimo y el máximo resultado del índice de densidad industrial de las empresas evaluadas.

NIVEL DE PELIGROSIDAD DE SUSTANCIAS

¿Qué necesita?

Inventario de sustancias químicas peligrosas (SQP) de cada empresa, calificación de peligrosidad de las sustancias según el MRQ y umbrales máximos reportados en el MRQ, PPAM u correspondiente.

¿Qué obtenemos?

Un indicador que ordena las empresas de acuerdo con el nivel de peligrosidad de sus sustancias en el Área Metropolitana

¿Cómo se calcula?

Para calcular el índice de peligrosidad de sustancias siga los siguientes pasos. Estos se deben realizar para CADA una de las empresas a evaluar (representada con el subíndice i):

1. Determine cuántas sustancias químicas peligrosas tiene la empresa, denótelo por la letra n .
2. Para cada una de las sustancias (considere un contador j de 1 hasta n):
 - a. identifique el inventario reportado en el MRQ, denótelo por Q_j
 - b. identifique el umbral máximo reportado en el MRQ/PPAM u correspondiente de dicha sustancia, denótelo por Q_{j-max}
 - c. identifique el nivel de peligrosidad de la sustancia según el MRQ, denótelo por P_j
 - d. determine el nivel de peligrosidad de la sustancia usando la siguiente fórmula:

$$Pel_j = P_j \left(\frac{Q_j}{Q_{j-max}} \right)$$

3. Una vez completado el nivel de peligrosidad por cada sustancia de la empresa, estime el nivel de peligrosidad con la siguiente fórmula:

$$IS_i = \sum_{j=1}^n Pel_j = Pel_1 + Pel_2 + Pel_3 + \dots + Pel_n$$

4. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor nivel de peligrosidad de sustancias) a 1 (empresa con mayor nivel de peligrosidad) con la siguiente normalización

$$IS_{in} = \frac{IS_i - \min(IS)}{\max(IS) - \min(IS)}$$

Donde $\min(IS)$ y $\max(IS)$ son el mínimo y el máximo resultado del nivel de peligrosidad de sustancias de las empresas evaluadas.

NIVEL DE PELIGROSIDAD DE EQUIPOS

¿Qué necesita?

Número de equipos y su peligrosidad según el MRQ de cada una de las empresas evaluadas

¿Qué obtenemos?

Un indicador que ordena las empresas de acuerdo con el nivel de peligrosidad y la cantidad de sus equipos de proceso en el Valle de Aburrá

¿Cómo se calcula?

Para calcular el índice de peligrosidad de equipos siga los siguientes pasos. Estos se deben realizar para CADA una de las empresas a evaluar (representada con el subíndice i):

1. Determine cuántos equipos tiene la empresa con peligrosidad muy baja según el MRQ, denótelo por la letra N_1 . Si no hay equipos, tome $N_1 = 0$.
2. Determine cuántos equipos tiene la empresa con peligrosidad baja según el MRQ, denótelo por la letra N_2 . Si no hay equipos, tome $N_2 = 0$.
3. Determine cuántos equipos tiene la empresa con peligrosidad media según el MRQ, denótelo por la letra N_3 . Si no hay equipos, tome $N_3 = 0$.
4. Determine cuántos equipos tiene la empresa con peligrosidad alta según el MRQ, denótelo por la letra N_4 . Si no hay equipos, tome $N_4 = 0$.
5. Determine cuántos equipos tiene la empresa con peligrosidad muy alta según el MRQ, denótelo por la letra N_5 . Si no hay equipos, tome $N_5 = 0$.
6. Determine el índice de peligrosidad de equipos de la empresa con la siguiente fórmula:

$$IE_i = \frac{0.2 \cdot N_1 + 0.4 \cdot N_2 + 0.6 \cdot N_3 + 0.8 \cdot N_4 + 1 \cdot N_5}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5}$$

5. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor índice de peligrosidad de equipos) a 1 (empresa con mayor índice de peligrosidad) con la siguiente normalización

$$IE_{in} = \frac{IE_i - \min(IE)}{\max(IE) - \min(IE)}$$

Donde $\min(IE)$ y $\max(IE)$ son el mínimo y el máximo resultado del índice de peligrosidad de equipos de las empresas evaluadas.

ÍNDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL

¿Qué necesita?

Resultado del índice de densidad industrial, peligrosidad de sustancias, peligrosidad de equipos e índice de vulnerabilidad

¿Qué obtenemos?

Un indicador que califica a las empresas de acuerdo con el nivel de peligrosidad en el Valle de Aburrá para cada una de las amenazas de origen natural contempladas (inundación, avenida torrencial y movimientos en masa)

¿Cómo se calcula?

Para calcular el índice de peligrosidad de las empresas siga los siguientes pasos:

1. Construya la matriz de evaluación por pares siguiendo la escala de Saaty. Esta matriz se construye de la siguiente manera
 - a. De manera concertada, indique si el índice de densidad industrial es (1) igualmente importante, (3) moderadamente más importante, (5) más importante, (7) fuertemente más importante o (9) extremadamente más importante que el índice de peligrosidad de sustancias.
 - b. Repita el paso anterior para cada una de las combinaciones entre el índice de densidad industrial, peligrosidad de equipos, peligrosidad de sustancias y para el índice de vulnerabilidad.
 - c. Organice los resultados en forma matricial como se muestra esquemáticamente en la siguiente figura con las letras A, B y C, de manera que sea:
 - i. Recíproco es decir que, si A es ligeramente más importante que B, entonces B tiene una calificación de 1/3 con respecto a A y
 - ii. Su diagonal es 1 porque cada criterio es igualmente importante consigo mismo.

	A	B	C
A	1	3	5
B	1/3	1	3
C	1/5	1/3	1

2. Verifique que la matriz sea consistente, es decir que las calificaciones no se contradigan, siguiendo las indicaciones plasmadas en la sección 7.2.
3. Determine los pesos de los cuatro indicadores usando el vector de prioridad de esta matriz.
4. Determine el índice de peligrosidad industrial con la siguiente fórmula:

$$IPel_i = w_{sust} \cdot IS + w_{eq} \cdot IE + w_{den} \cdot I_{den} + w_{vul} \cdot I_{vul}$$

Donde el vector de w_{sust} , w_{eq} , w_{den} y w_{vul} es el vector de prioridad de cada uno de los indicadores.

5. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor índice de peligrosidad) a 1 (empresa con mayor índice de peligrosidad) con la siguiente normalización

$$IPel_{in} = \frac{IPel_i - \min(IPel)}{\max(IPel) - \min(IPel)}$$

Donde $\min(IPel)$ y $\max(IPel)$ son el mínimo y el máximo resultado del índice de peligrosidad de las empresas evaluadas.

6. Clasifique cada empresa siguiendo la siguiente escala: Menor (0-0.2), Intermedio menor (0.2-0.4), intermedio (0.4-0.6), intermedio mayor (0.6-0.8) y mayor (0.8-1)

NIVEL POTENCIAL DE EXPOSICIÓN

¿Qué necesita?

La ubicación de las empresas, información reportada en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) o Planes de Gestión de los municipios del Valle de Aburrá.

¿Qué obtenemos?

Un indicador que califica a las empresas de acuerdo con el nivel potencial de exposición a una distancia de 300 m alrededor de cada empresa.

¿Cómo se calcula?

Para estimar el nivel potencial de exposición de las empresas siga los siguientes pasos:

1. Considerando lo reportado en el POT a una distancia menor o igual de 300 m alrededor de la empresa indique el siguiente nivel de prioridad:
 - a. Clasificación del suelo: Urbano (9), Expansión (1), Rural-Rural (1), Rural-corredor vial (3), Rural-suburbano (5), Rural-Campestre (5) y Rural-centro poblado (7).
 - b. Uso actual del suelo: Residencial (9), Industrial (3), Comercial (7), Servicios (7), Mixto (5), Agropecuario (1), Forestal (1), Minero (1) y Otros (1).
 - c. Equipamientos: Salud (9), Educación (7), Seguridad (7), Culto (3), Recreación-Deporte (3), Comercial (5), Servicios Públicos (3), Sociales (5) e Institucionales (5).
2. Rasterice la información considerando las calificaciones y su suma

$$NE_i = CS + US + Eq$$

Donde CS es la calificación de la clasificación del suelo, US del uso del suelo y Eq de los equipamientos.
3. Considere las áreas predominantes en cada polígono, como se ilustra a continuación

Clasificación del suelo

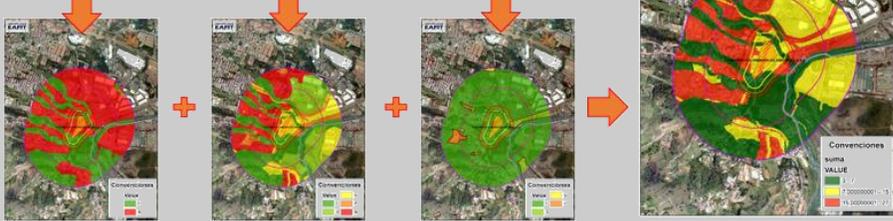


Usos actuales del suelo



Equipamientos





4. Ordene los resultados entre 0 (empresa con menor nivel potencial de afectación) a 1 (empresa con mayor nivel de potencial afectación) con la siguiente normalización

$$NE_{in} = \frac{NE_i - \min(NE)}{\max(NE) - \min(NE)}$$

Donde $\min(NE)$ y $\max(NE)$ son el mínimo y el máximo resultado del nivel de potencial de afectación de las empresas evaluadas.

5. Clasifique cada empresa siguiendo la siguiente escala: Menor (0-0.2), Intermedio menor (0.2-0.4), intermedio (0.4-0.6), intermedio mayor (0.6-0.8) y mayor (0.8-1)

ÍNDICE DE CONDICIÓN DE RIESGO

¿Qué necesita?
El resultado del índice de peligrosidad y nivel potencial de exposición
¿Qué obtenemos?
Un indicador que califica a las empresas de acuerdo con la condición potencial de riesgo en el Valle de Aburrá para cada una de las amenazas de origen natural contempladas (inundación, avenida torrencial y movimientos en masa).
¿Cómo se calcula?
Para estimar el índice de condición de riesgo de las empresas siga los siguientes pasos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccione el resultado del índice de peligrosidad 2. Seleccione el resultado del nivel de potencial de exposición 3. Determine el nivel de condición de riesgo usando la siguiente matriz de valoración, en donde se cruzan los resultados de los puntos 1 y 2. Este resultado prioriza las empresas que deben hacer estudios de detalle.

		Índice de peligrosidad				
		Menor	Menor-intermedio	Intermedio	Intermedio-mayor	Mayor
Nivel potencial de exposición	Mayor	CR3	CR4	CR4	CR4	CR5
	Intermedio-mayor	CR3	CR3	CR3	CR4	CR4
	Intermedio	CR2	CR3	CR3	CR3	CR4
	Menor-intermedio	CR2	CR2	CR3	CR3	CR3
	Menor	CR1	CR2	CR2	CR2	CR3

7.2 CONSTRUCCIÓN MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES

En la estimación del índice de peligrosidad se realizó un proceso analítico jerárquico para valorar el nivel de relevancia de los índices de vulnerabilidad, nivel de sustancias, nivel de equipos y densidad industrial. Este proceso se hizo con miembros del equipo técnico del AMVA, obteniendo como resultados los que se muestran en la Tabla 27. Esta Tabla presenta el nivel concertado de importancia siguiendo una comparación por pares a través de la escala de Saaty (ver sección anterior para más detalles).

Tabla 27. Resultados evaluación por pares para la estimación del índice de peligrosidad

	Índice Vulnerabilidad	Nivel sustancias	Nivel equipos	Densidad Industrial
Índice vulnerabilidad	1	1	5	3
Nivel sustancias	1	1	5	5
Nivel equipos	1/5	1/5	1	1
Densidad Industrial	1/3	1/5	1	1

Esta información se usa para determinar el vector de prioridad a partir del vector propio principal de la matriz de forma normalizada. Este vector propio se puede determinar de la siguiente forma alternativa y no representa una diferencia significativa en el resultado (Vargas, 2010). Primero, se normaliza la matriz obtenida en la Tabla 27 por cada una de las columnas y posteriormente se toma la contribución promedio por cada fila, obteniendo como resultado el vector de prioridad de la Tabla 28.

Estos valores corresponden a la contribución de cada una de las variables para determinar el índice de peligrosidad industrial. Los resultados indican que el índice de vulnerabilidad y el nivel de sustancias peligrosas son los más representativos (alrededor del 82%), lo que es coherente al valorar el potencial de volumen liberado y la peligrosidad de estas sustancias. En menor medida se encuentra la contribución del nivel de peligrosidad de los equipos y finalmente el de la densidad industrial. Cabe resaltar que el equipo técnico de la EAFIT había realizado este ejercicio previamente, obteniendo unos resultados bastante similares con una diferentes cercana al 5% en los porcentajes obtenidos.

Tabla 28. Resultados del vector de prioridad

Variable	Vector de prioridad
Índice vulnerabilidad	38.27%
Nivel sustancias	43.19%
Nivel equipos	8.64%
Densidad Industrial	9.90%

Para asegurarse de que estos resultados sean coherentes, se implementó el criterio que utiliza la tasa de consistencia (CR) dado por la siguiente expresión:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \text{ (10\%)} \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde CI es el índice de consistencia y RI es un índice de aleatoriedad reportado por Saaty que depende del número de variables implementado en el análisis. Para el presente caso, se tienen 4 variables lo que conlleva a que $RI = 0.9$ (Saaty T. , 2005). Por su parte, el índice de consistencia se determina de la siguiente forma:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde λ_{max} es el máximo autovalor de la matriz de comparación por pares y n es el número de variables. En este caso $\lambda_{max} = 4.033$ y $n = 4$, lo que da como resultado que $CI = 0.011$ y $CR = 1.2\%$ que es menor al 10% requerido, confirmando que los resultados son consistentes.

7.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DEL MRQ: ALGUNAS CONSIDERACIONES

La metodología planteada en este documento se implementó tomando como insumo la información reportada en el Mapa de Riesgo Químico (MRQ) así como aquella provista en los formatos de recolección de información durante las visitas a cada empresa. Dentro de la información extraída en cada uno de estos archivos, por empresa se encuentra:

- Las sustancias químicas peligrosas
- El nivel de peligrosidad de las sustancias
- El inventario máximo reportado de las sustancias peligrosas
- Los umbrales máximos por sustancia definidos por la directiva SEVESO III o la GRE
- El inventario de los equipos reportados
- El nivel de peligrosidad de los equipos

Cabe resaltar que los inventarios de las sustancias químicas se reportaban en toneladas, pero al hacer la conversión en algunos casos representaban cantidades muy inferiores a 1 kg. Al hacer la verificación con el AMVA se reconoció que no había umbral mínimo para reportar en el MRQ y por tanto fueron contempladas junto con las demás sustancias, aun cuando su liberación no represente un evento mayor.

Otro elemento por mencionar es que no todas las sustancias tenían un umbral máximo reportado por la GRE, por lo que fue necesario incorporar herramientas complementarias como en el caso del Programa de Prevención de Accidente Mayor (PPAM) que fue recientemente adoptado por el Decreto 1347 de 2021 del Ministerio de Trabajo o por la directiva Seveso III para la prevención de accidentes graves en la Unión Europea. Las sustancias que fueron abordadas en este caso fueron: ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico, hidróxido de sodio e hidrosulfito de sodio. Para una sustancia adicional correspondiente al anhídrido maleico, no fue posible identificar su umbral máximo en los instrumentos mencionados previamente, por lo que no fue posible contemplarla en el conjunto de sustancias de tres empresas. El Anexo 2 resume las consideraciones contempladas para cada una de las sustancias mencionadas.

8. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En términos de los resultados obtenidos, se hizo un análisis diferenciado dependiendo de la amenaza de origen natural por inundación, avenida torrencial o movimiento en masa. Además, para la visualización de los resultados, se dividió el mapa del Valle de Aburrá en 6 recuadros, tal como lo muestra la Ilustración 40. Lo anterior, con el objetivo de que se pudiera realizar un zoom sobre cada una de estas zonas e identificar más fácilmente las instalaciones presentes en cada uno de los municipios. A continuación, se muestran los principales hallazgos.

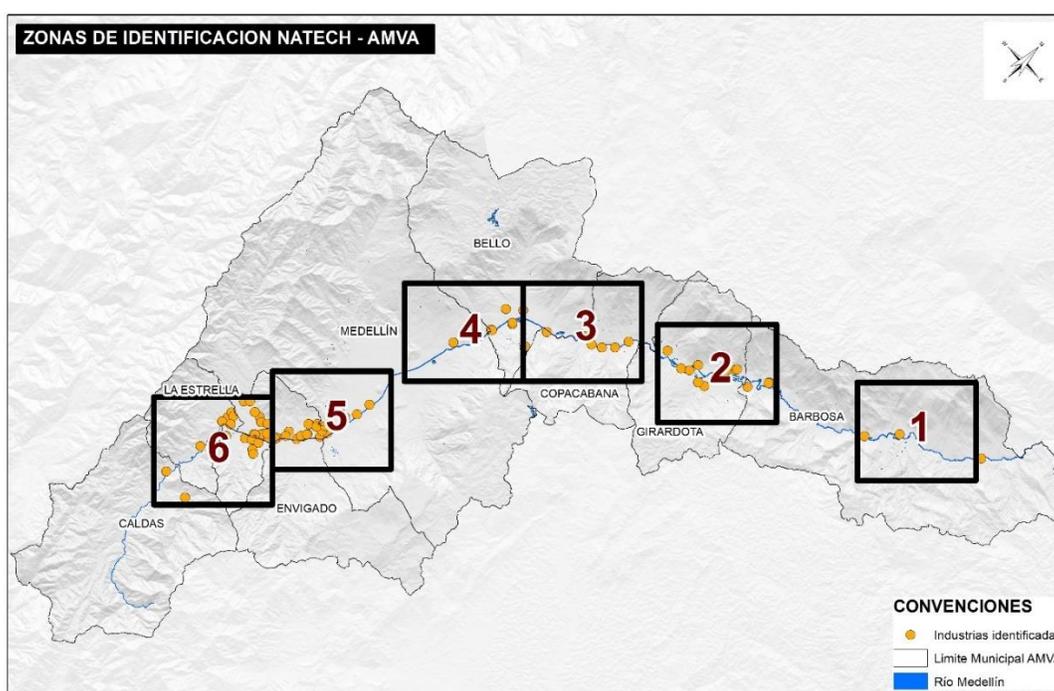


Ilustración 40. División por zonas para identificación y visualización de instalaciones industriales en el Valle de Aburrá con diferentes niveles de peligrosidad industrial. Fuente: Elaboración propia.

Complementariamente, se muestran los resultados derivados de la implementación de la metodología para determinar la densidad industrial. Ésta se desarrolló tomando como herramienta el software ArcGIS, poniendo en primer plano los polígonos de aquellas industrias que fueron halladas para el análisis. Posteriormente se elaboró una serie de buffer (50, 100, 150 y 300 metros) sobre los polígonos para identificar la cercanía que existía entre una y otra. Una vez se obtuvo el resultado se elaboró una disolución de datos arrojados por el buffer para obtener como producto cuales industrias se encontraban cerca y lejos, dejando claro en el análisis que solo sumaban aquellas que tuvieran contacto real con el polígono y no con su buffer. Se pudo identificar que la zona con mayor densidad y

proximidad es la zona sur, principalmente el municipio de Itagüí. La Ilustración 41 muestra los resultados obtenidos.

DENSIDAD INDUSTRIAL
DENTRO DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

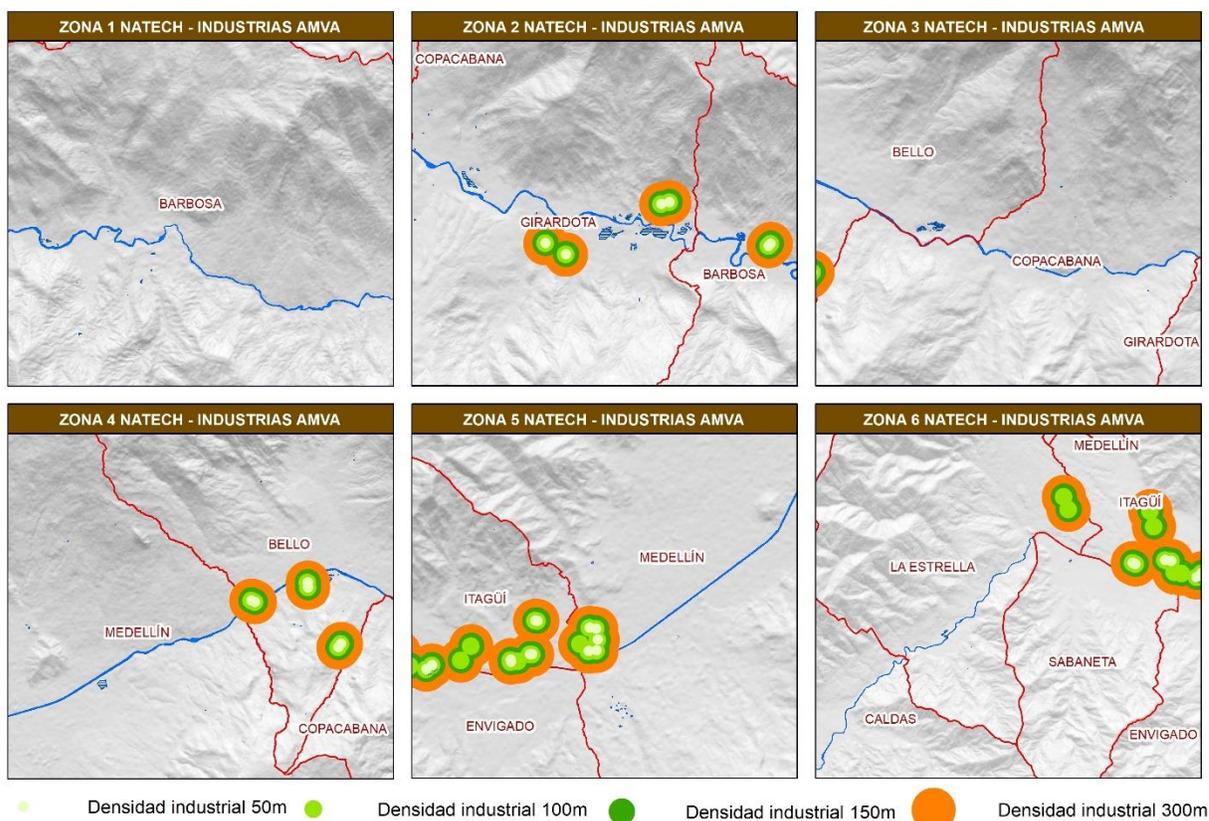


Ilustración 41. Densidad industrial según diferentes búferes. Fuente: Elaboración propia

8.1 ESCENARIO DE INUNDACIÓN

Para el escenario de inundación se identificaron 16 empresas en una amenaza media y otras 16 en una amenaza alta. Con relación a estas empresas en amenaza alta, se reporta que las sustancias más peligrosas se encuentran en un 38% Gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 incluido el GLP y gas natural, 13% acetileno, 13% cloro y el resto de forma distribuida en sustancias como compuestos de níquel, gasóleos, gasolinas (y naftas), peróxido de hidrógeno y otras sustancias inflamables. Revisando los posibles eventos a contemplar por una liberación de estas sustancias se resalta la posibilidad de un incendio, explosión, intoxicación por inhalación y liberación en medio acuático. Para el caso de las empresas en amenaza media, las sustancias químicas más peligrosas corresponden en un 41% a gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 incluido el GLP y gas natural, 18% el peróxido de hidrógeno, 18% sustancias alternativas inflamables y con afectación ambiental y, de forma distribuida, sustancias como ácido sulfúrico, compuestos con níquel, etanol, trióxido de arsénico, ácido arsenioso III y/o sales. Dentro de los

escenarios para tener en cuenta se encuentran niveles de toxicidad por inhalación, ingestión o por daño cutáneo. En menor medida también hay sustancias con un potencial daño al medio acuático o inflamables que pueden desencadenar escenarios de incendio o explosión.

En términos del índice de peligrosidad, se obtuvo la distribución mostrada en la Ilustración 42, en donde se resaltan 2 empresas en nivel mayor y 1 en intermedio, seguido de otras cinco compañías en intermedio menor y 24 en un nivel menor. La Tabla 29 muestra los nombres de las empresas con las mayores calificaciones.

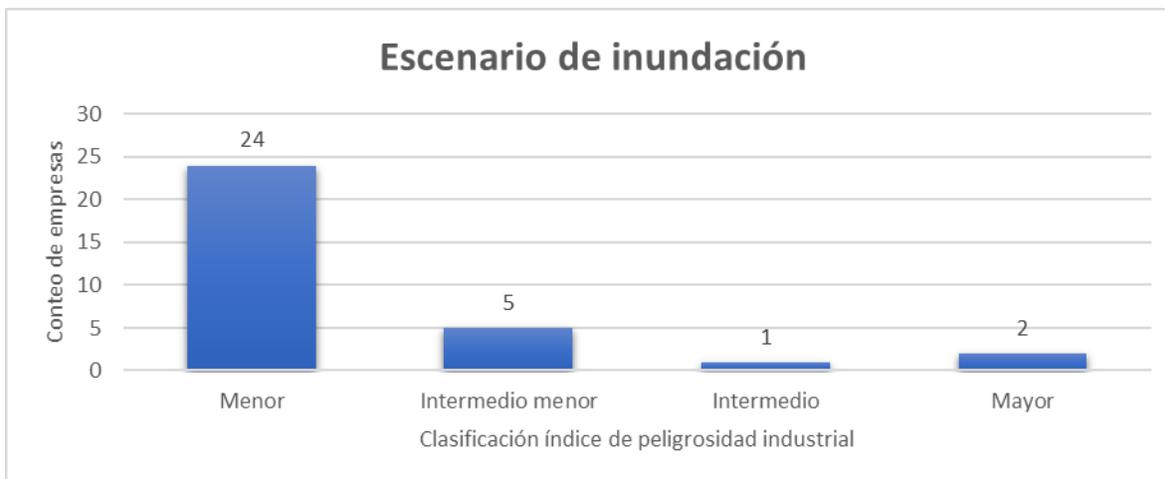


Ilustración 42. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligrosidad industrial para el escenario de inundación

Las empresas que tuvieron una mayor calificación se encuentran en Barbosa (PROQUIMCOL SA) e Itagüí (COLOMBINA SA y Fabrica de Licores y Alcoholes de Antioquia). De las demás empresas (nivel Intermedio menor y menor) el 59% también se encuentran en Itagüí y el resto en los municipios de Barbosa (17%), Bello (14%) y Girardota (10%). La distribución de estos resultados se muestra más claramente en la Ilustración 43. Se observa que las instalaciones con un nivel de peligrosidad mayor se ubican en las zonas 2 y 5 respectivamente.

Tabla 29. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de inundación

Empresa	Resultado Índice de Peligrosidad Ind.	Sustancias peligrosas que reaccionan con el agua
PROQUIMCOL S.A.	Mayor	Hidróxido de sodio
COLOMBINA SA	Mayor	Hidróxido de sodio, Ácido sulfúrico
Fábrica de Licores y Alcoholes de Antioquia	Intermedio	Hidróxido de sodio, Ácido sulfúrico

Empresa	Resultado Índice de Peligrosidad Ind.	Sustancias peligrosas que reaccionan con el agua
Fábrica de Artículos de Protección SAS	Intermedio menor	N. A
Empresa de Cosméticos y Servicios S.A SEMCO	Intermedio menor	N. A
COLTEJER S. A	Intermedio menor	Hidróxido de sodio, Hidrosulfito de sodio, Ácido sulfúrico, Acetileno
Cervecería Unión S. A	Intermedio menor	Hidróxido de sodio, Ácido sulfúrico
Compañía De Empaques S. A	Intermedio menor	N. A

Nota: Es importante que se considere el rango de inventario de las sustancias que reaccionan con el agua y se analice su peligrosidad según la ficha de datos de seguridad.

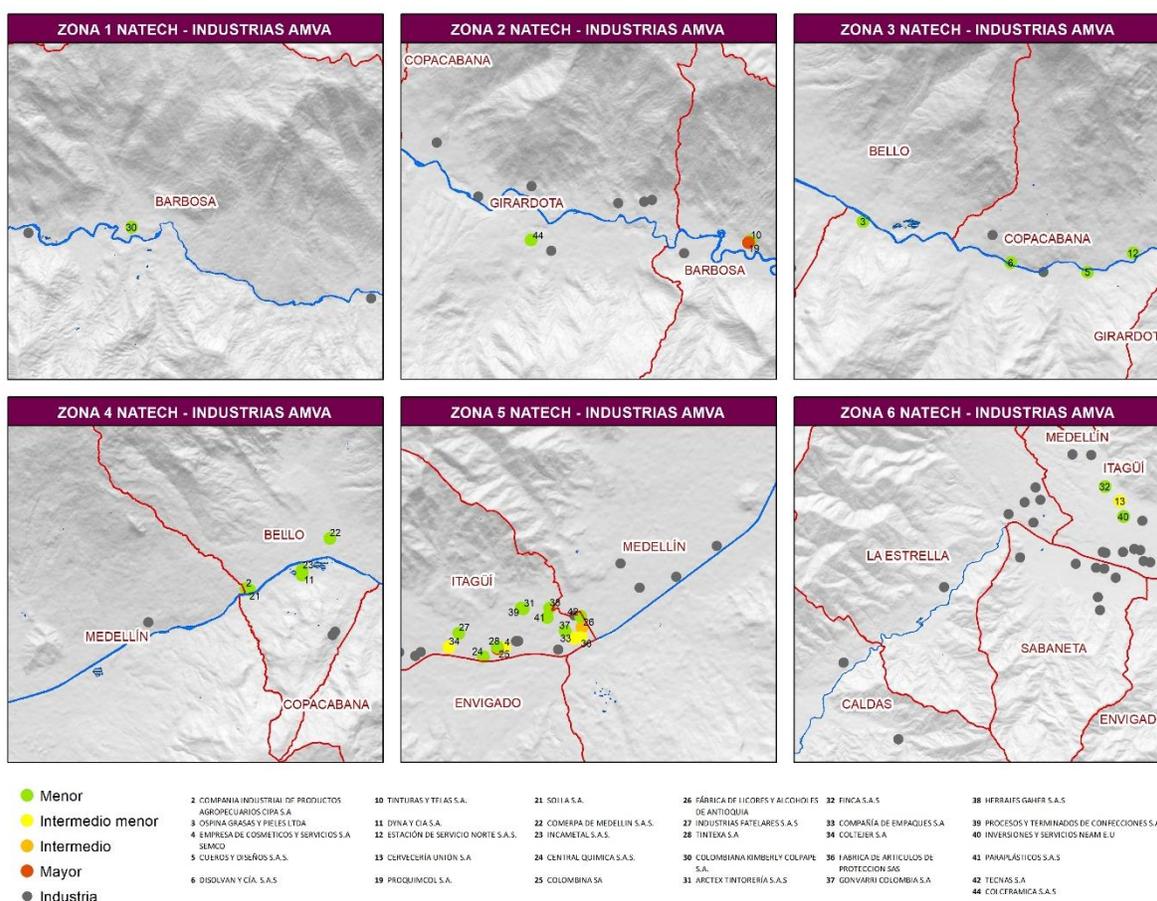


Ilustración 43. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de inundación. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se determinó el índice de condición de riesgo para cada empresa sujeta a amenaza de inundación (baja, media, alta), contemplando las diferentes áreas de exposición por el uso y tipo del suelo, los equipamientos aledaños y el resultado del índice de peligrosidad. La Ilustración 43 muestra la distribución de áreas alrededor de cada

empresa con un búfer de 300 metros. Estos resultados se presentan, de forma ordenada, es decir, de menor (verde oscuro) a mayor (rojo) condición de riesgo. Dentro de los resultados, se puede observar que COLOMBINA SA (25%), PROQUIMCOL (7%), y CERVECERÍA UNIÓN SA (2%) son las empresas con mayor porcentaje de áreas en condición de riesgo Natech 4 (CR4). Además, se evidencia que el 99% del área alrededor de la Fábrica de Licores y Alcoholes de Antioquia tiene una condición de riesgo Natech 3 (CR3) y que empresas como FINCA SAS, Herrajes Gaher SAS o Gonvarri Colombia SA tienen cerca de la mitad del área a su alrededor con una calificación de CR3.

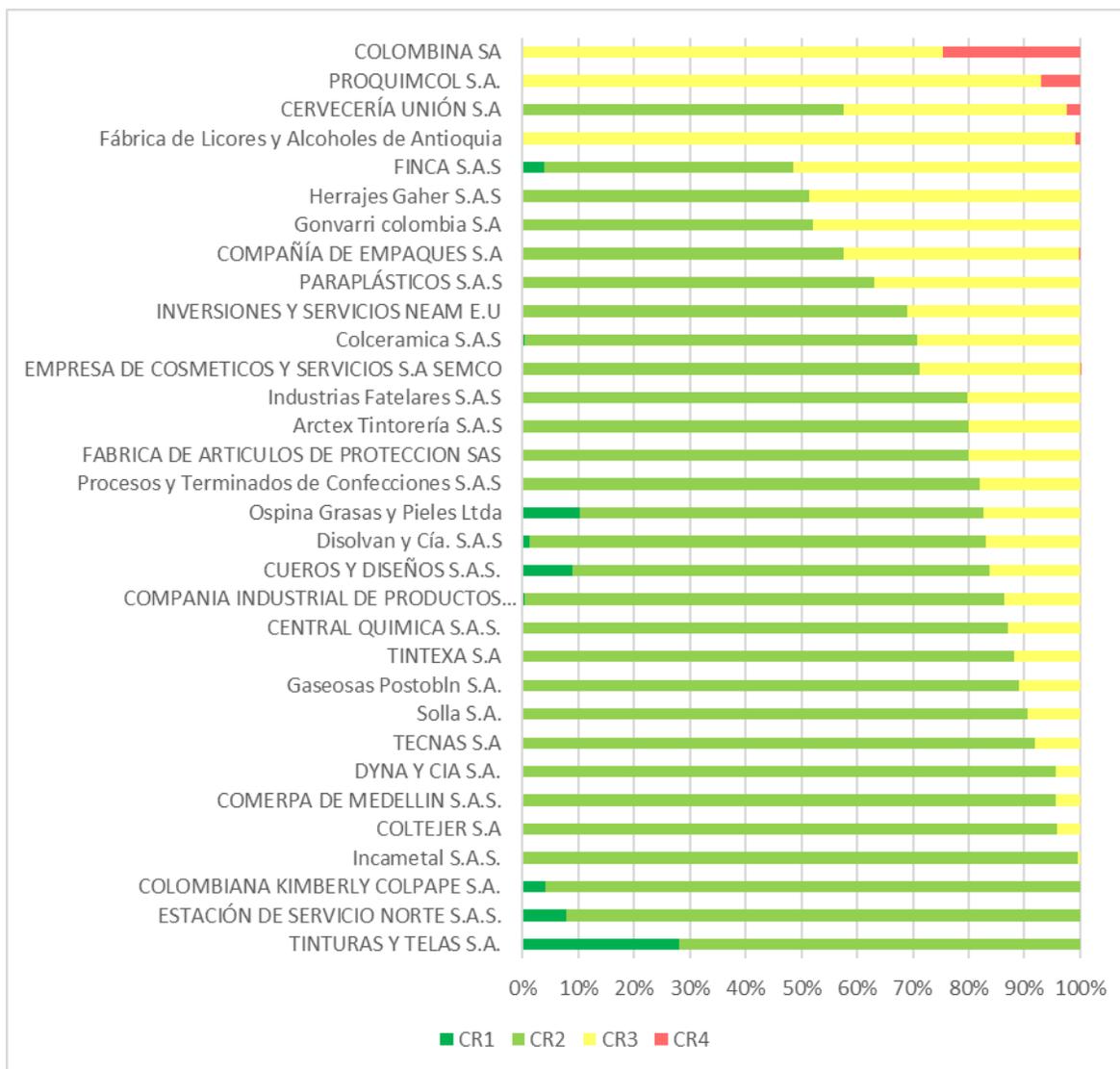


Ilustración 44. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de inundación.

Estos búfer se encuentran ubicados en los municipios de Envigado, Bello, Copacabana, Girardota, Itagüi, Medellín y Barbosa (Ilustración 45). Se debe tener en cuenta que las

instalaciones que aparecen registradas en el municipio de Medellín corresponden a aquellas que son colindantes con otros municipios y por lo tanto su ubicación se registra en ambos. La anterior aclaración es pertinente dado que para las instalaciones industriales ubicadas en Medellín no se realizó la estimación de la condición de riesgo debido a falta de información para la caracterización de las amenazas.

Dentro de los resultados obtenidos, se puede observar que en el municipio de Barbosa e Itagüí es donde se tiene la mayor cantidad de área con una condición de riesgo Natech 4 (CR4). Para el caso de Barbosa se tiene la empresa PROQUIMCOL, mientras que para el municipio de Itagüí empresas como Colombina SA, Compañía de Empaques SA, Fábrica de Licores y Alcoholes de Antioquia y Cervecería Unión SA. Es importante mencionar que en esta ilustración no se está haciendo una comparación directa del área entre municipios, sino determinando qué porcentaje del área alrededor de cada instalación industrial se encuentra en una condición de riesgo Natech sea CR1, CR2, CR3, CR4 o CR5. Por lo anterior, la diferencia entre Barbosa e Itagüí radica en el hecho de que a pesar de que este último municipio (Itagüí) tiene muchas más empresas, la proporción del área de los búferes en CR4 es mayor para el municipio de Barbosa, incluso si se trata de sólo 3 empresas. Con relación al área equivalente por cada empresa, correspondiente al total del área de la instalación industrial sobre el número de instalaciones, se observa que Barbosa tiene un área equivalente de 48.4 ha, mientras que Itagüí de 38.03 ha en condición de riesgo Natech 4 (CR4), lo que nuevamente resalta la importancia de contemplar a PROQUIMCOL y los elementos expuestos a su alrededor.

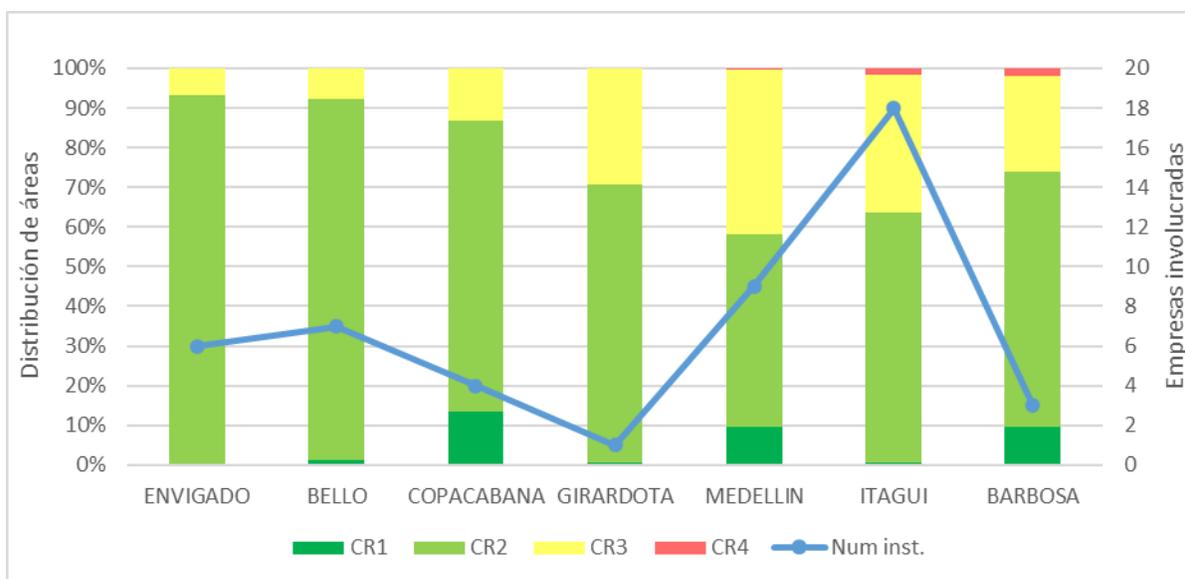


Ilustración 45. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de inundación.

8.2 ESCENARIO DE AVENIDA TORRENCIAL

Para el escenario de avenida torrencial se reportaron 15 empresas en amenaza media y 3 en amenaza alta. Estas últimas tienen como sustancia química más peligrosa gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 incluido el GLP y gas natural lo que conlleva a la posibilidad de escenarios de incendio y explosión. Para las empresas en amenaza media esta tipología de sustancias abarca el 33% de las empresas, seguido del 13% para etanol y el resto tiene reportes iguales de acetileno, cloro, compuestos con níquel, gasóleo, gasolina y naftas, peróxido de hidrógeno, sustancias alternativas inflamables y trióxido arsénico. Lo que conlleva a las mismas posibles afectaciones según lo indicado en el caso de inundación.

Sobre los resultados del índice de peligrosidad industrial se puede mencionar que nuevamente 2 instalaciones estuvieron en una categoría mayor, 1 en intermedio, y como lo muestra la Ilustración 46, solo se identificó 1 instalación en intermedio menor y 14 en menor. Estas instalaciones con índice de peligrosidad menor ya se habían obtenido para el caso de inundación, excepto la empresa Autotecnia Colombiana S.A.S que tiene un índice de peligrosidad industrial menor para la amenaza de avenida torrencial. Los detalles de los nombres de las empresas sujetas a la amenaza por avenida torrencial se presentan en la Tabla 30.

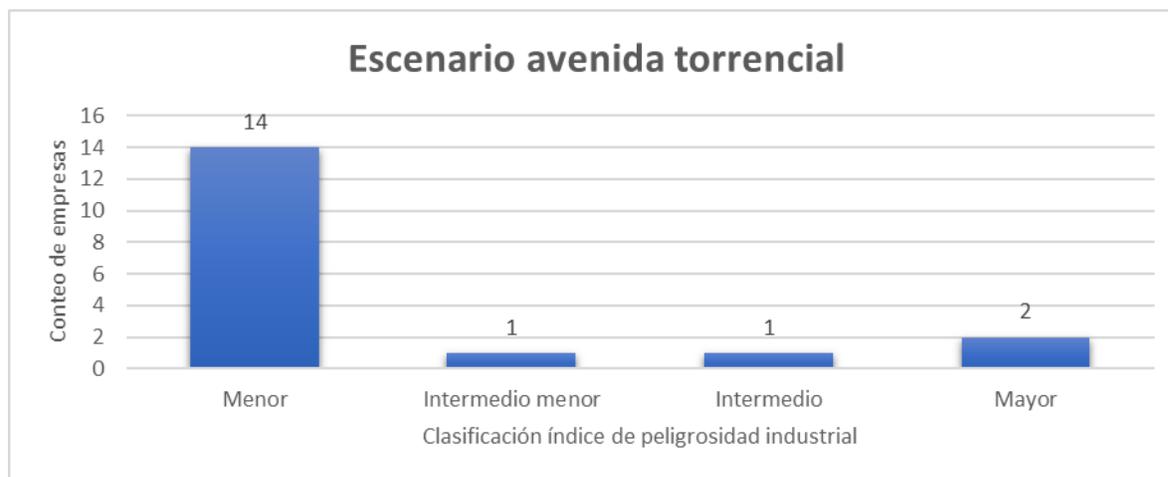


Ilustración 46. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligro para el escenario de avenida torrencial

Revisando las instalaciones que tuvieron un resultado entre mayor a intermedio menor, se puede evidenciar que sigue el mismo orden que en el caso de inundación, salvo que para avenida torrencial no se incluyen los casos de la Fábrica de Artículos de Protección SAS, Coltejer S.A, Cervecería Unión S.A y Compañías de Empaques S.A. Para una clasificación menor se tienen 9 empresas en Itagüí, 3 en Barbosa, 1 en Bello y 1 en Girardota. Sobre estas empresas se contemplan tanto en el escenario de inundación, como en el de avenida

torrencial las siguientes: Solla S.A, TINTEXA S.A, Comerpa de Medellín S.A.S., Gaseosas Postobón S.A. (Bello), Colceramica S.A.S, Colombiana Kimberly Colpapel S.A., Tinturas y Telas S.A., Industrias Fatelares S.A.S, Incametal S.A.S., Compañía Industrial de Productos Agropecuarios CIPA S.A, FINCA S.A.S, Central Química S.A.S., DYNA Y CIA S.A. y Estación de Servicio Norte S.A.S.

Tabla 30. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de avenida torrencial

Empresa	Resultado Índice de Peligrosidad Ind.	Sustancias peligrosas reaccionan con agua
PROQUIMCOL S.A.	Mayor	Hidróxido de sodio
COLOMBINA SA	Mayor	Hidróxido de sodio, Ácido sulfúrico
Fábrica de Licores y Alcoholes de Antioquia	Intermedio	Hidróxido de sodio, Ácido sulfúrico
Empresa de Cosméticos Y Servicios S.A SEMCO	Intermedio menor	N. A

Nota: Es importante que se considere el rango de inventario de las sustancias que reaccionan con el agua y se analice su peligrosidad según la ficha de datos de seguridad.

La distribución de los resultados para la amenaza de avenida torrencial se muestra más claramente en la Ilustración 47. Se observa que nuevamente las instalaciones con un nivel de peligrosidad mayor se ubican en las zonas 2 y 5, en los municipios de Barbosa e Itagüí respectivamente.

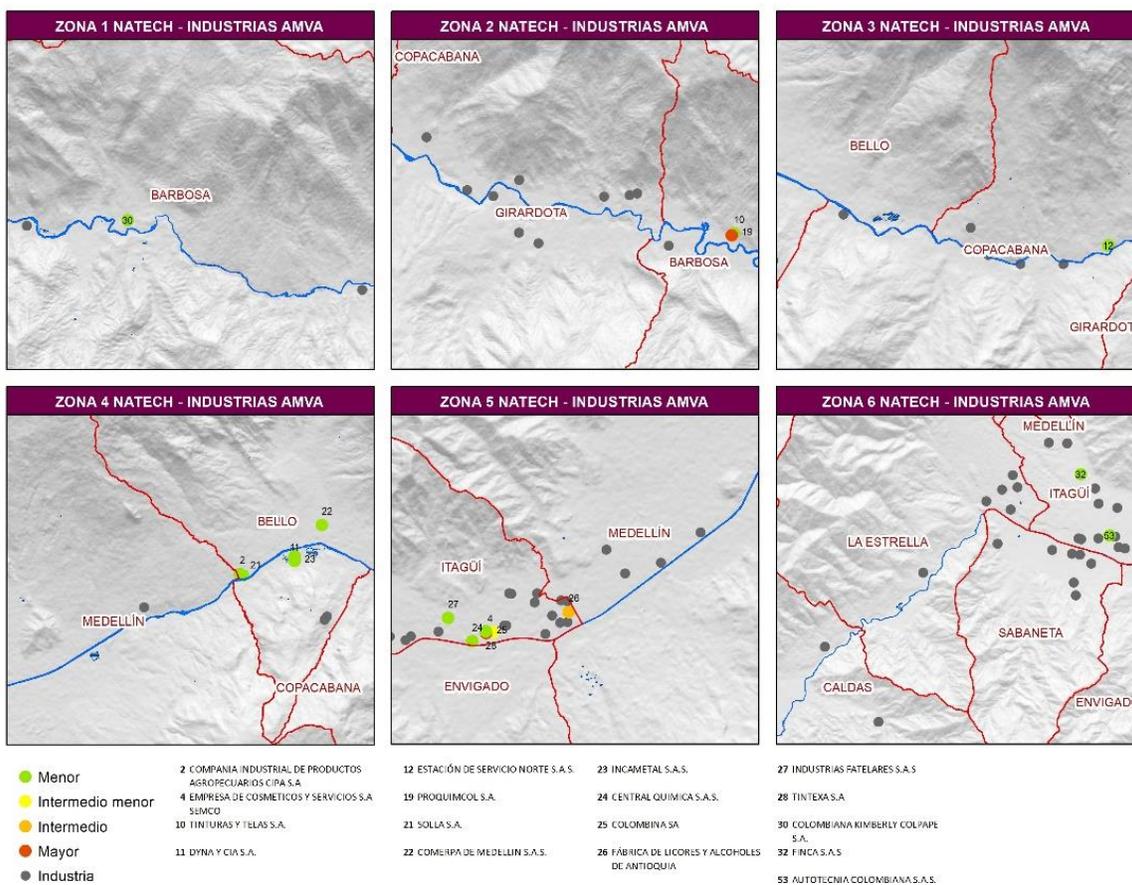


Ilustración 47. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de avenida torrencial. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la condición de riesgo por avenida torrencial y tal como se presenta en la Ilustración 48, se obtuvieron resultados similares a los descritos en la amenaza de inundación con PROQUIMCOL y COLOMBINA SA a la cabeza con una mayor distribución de área en condición de riesgo Natech (CR4), la Fábrica de Licores y Alkoholes de Antioquia con una condición mayoritariamente de CR3. Se puede observar además que, aunque la Empresa de Cosméticos y Servicios S.A SEMCO tuvo una calificación intermedia menor para el índice de peligrosidad, la mayoría de su búfer se encuentra en una condición CR2 y el resto del búfer para esta misma empresa se encuentra en CR3 o CR4 debido a un uso de suelo residencial o de protección forestal.

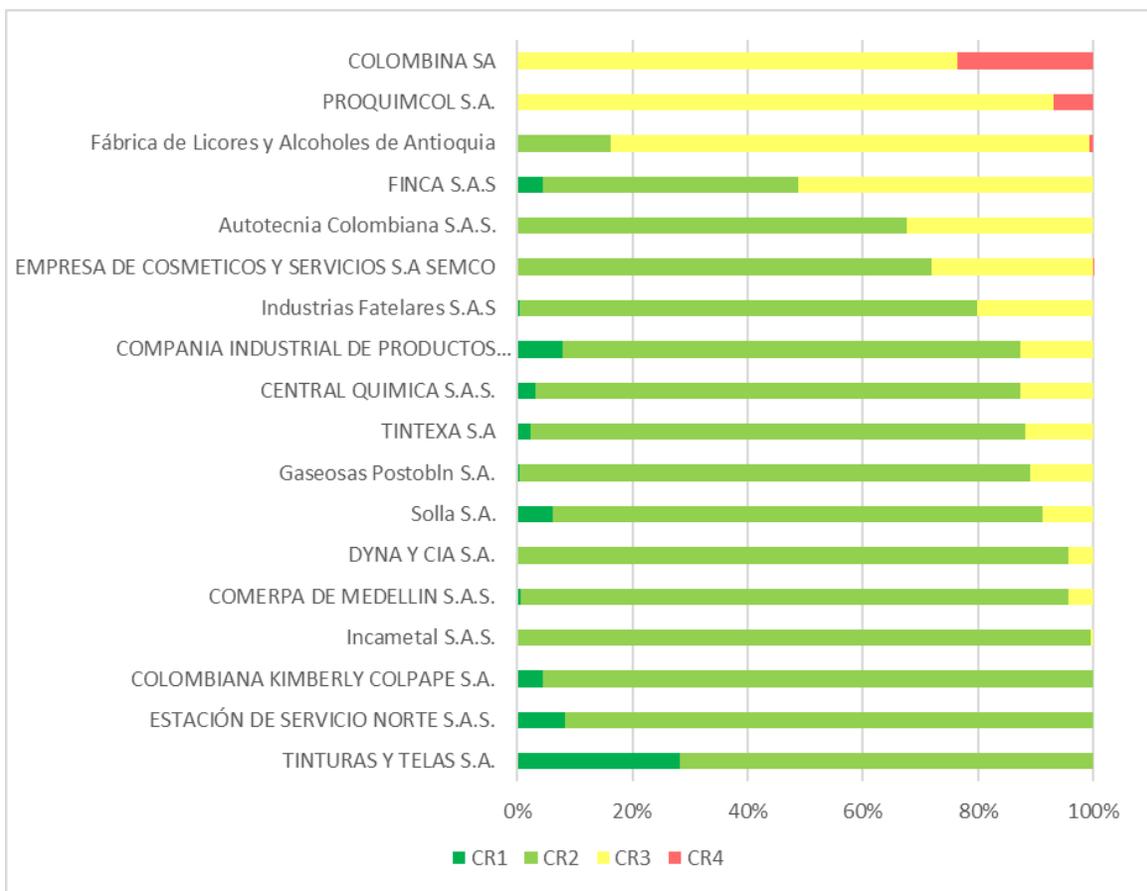


Ilustración 48. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de avenida torrencial.

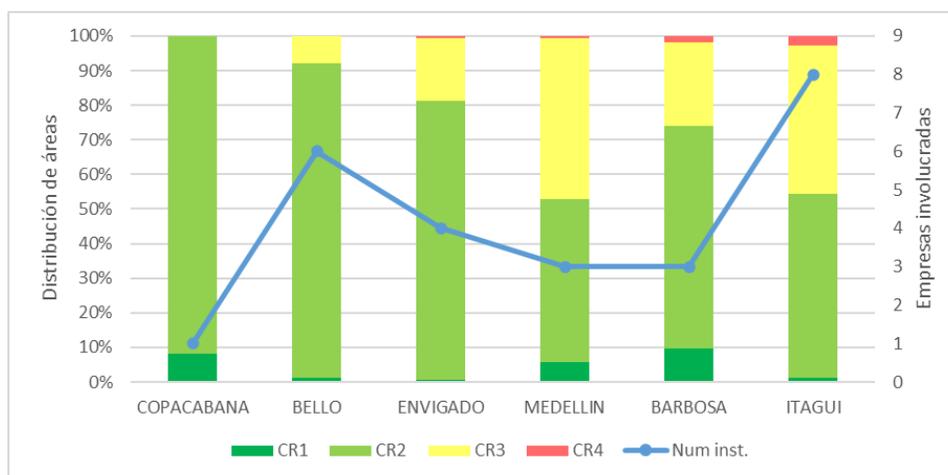


Ilustración 49. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de avenida torrencial

Por su parte, de acuerdo con la información presentada en la Ilustración 49, se puede evidenciar que el análisis por ubicación de las instalaciones industriales resaltó nuevamente una mayor presencia de aquellas en los municipios de Itagüí y Barbosa. Se observa además que Barbosa tiene un porcentaje significativamente menor de área con una calificación de condición de riesgo Natech 4 (CR4), en comparación con el caso de inundación. En general, se percibe una prelación de áreas en condición de riesgo Natech 2 (CR2) para los municipios de Copacabana, Bello y Envigado.

8.3 ESCENARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA

Para el escenario de movimientos en masa se reportaron 3 empresas en amenaza alta y 15 en amenaza media. Para las empresas en amenaza alta, las sustancias químicas más peligrosas incluyen gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 incluido el GLP y gas natural en un 31%, seguido de cloro con 15% y sustancias alternativas a los productos mencionados en las letras A a D del SGA con propiedades similares en lo relativo a la inflamabilidad y los peligros medioambientales con 15%. El resto de las sustancias más peligrosas se distribuye entre ácido sulfúrico, amoníaco anhídrido, clorato de sodio, etanol y peróxido de hidrógeno. Las empresas en una amenaza media tienen sustancias como tolueno, peróxido de hidrógeno, acrilonitrilo, o ácido sulfúrico. Las sustancias involucradas son similares a las ya discutidas para los casos de inundación y avenida torrencial, por lo que los posibles eventos accidentales incluyen incendios, intoxicaciones (inhalación), afectación cutánea o afectación al medio acuático.

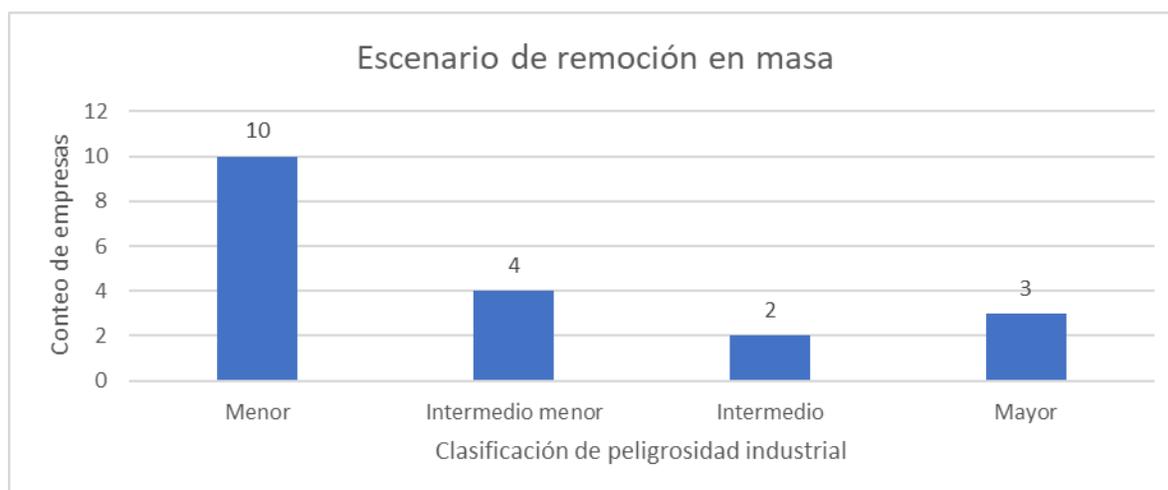


Ilustración 50. Distribución de empresas según el resultado del índice de peligro para el escenario de movimiento en masa

Sobre los resultados del índice de peligrosidad para la amenaza de movimientos en masa, se puede mencionar que 3 instalaciones recaen sobre la categoría mayor, 2 en intermedio,

4 en intermedio menor y finalmente 10 en menor, tal como se muestra en la Ilustración 50. Adicionalmente, se evidencia que las empresas Gases de Antioquia S.A. E.S.P. (Bello), la Operadora Avícola de Colombia S.A.S. (Girardota) y Cervecería Unión S.A (Itagüí) tienen un índice de peligrosidad industrial mayor, donde se resalta que las primeras dos empresas no están sujetas a las amenazas de inundación y avenidas torrenciales previamente descritas. Estos resultados se presentan en la Tabla 31, en donde también se muestra que las empresas Inversiones GLP S.A.S. E.S.P. y BYCSA S.A. tienen un índice de peligrosidad industrial intermedio, ambas en Barbosa. De las demás empresas, el 50% se encuentran en Itagüí, 29% en Barbosa y el resto están en Bello, Copacabana y Girardota.

Tabla 31. Empresas con los índices de peligros mayores, intermedio e intermedio menor para un escenario de movimiento en masa

Empresa	Resultado Índice de Peligro
Gases de Antioquia S.A. E.S.P.	Mayor
Cervecería Unión S. A	Mayor
Operadora Avícola Colombia S.A.S	Mayor
Inversiones GLP S.A.S. E.S.P.	Intermedio
BYCSA S.A.	Intermedio
Anhidridos y derivados de Colombia S.A. ANDERCOL	Intermedio menor
Disolvan y Cía. S.A.S	Intermedio menor
Industrias Haceb S.A.	Intermedio menor
Empresa de Cosméticos y Servicios S.A SEMCO	Intermedio menor

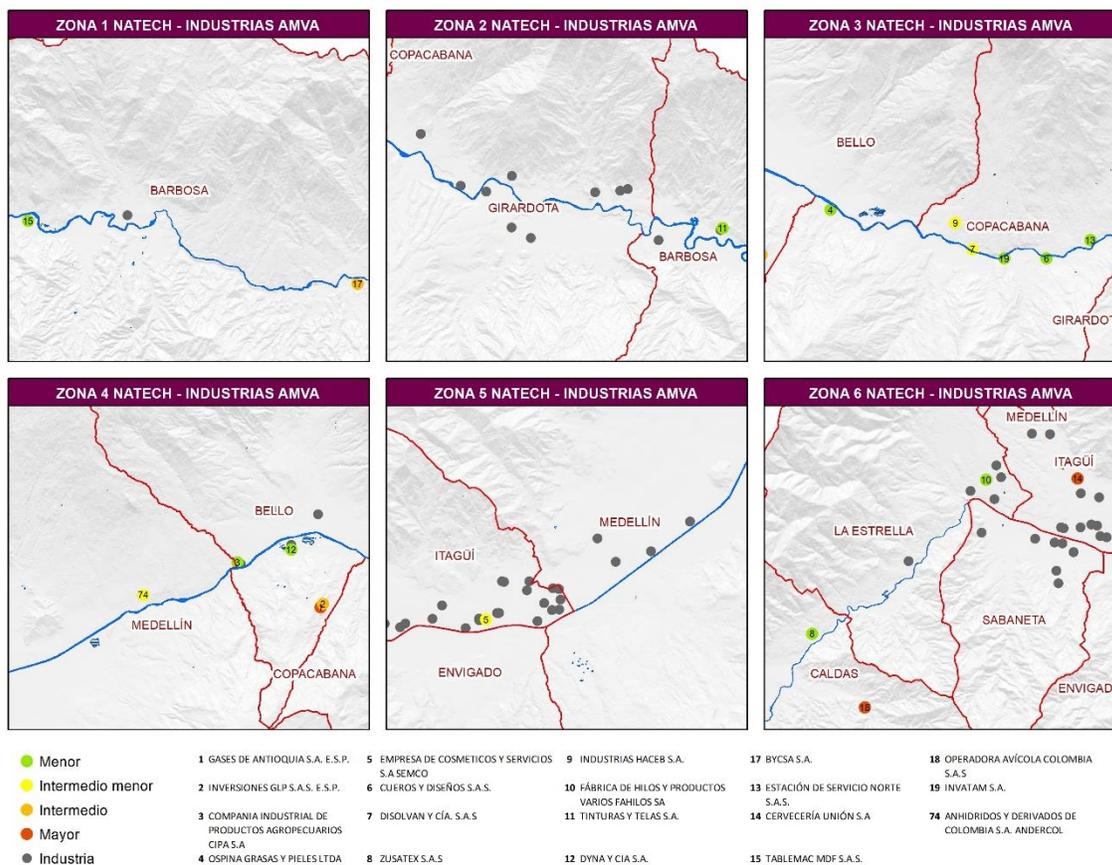


Ilustración 51. Resultados de peligrosidad industrial para la amenaza de movimientos en masa.
Fuente: Elaboración propia

La distribución de los resultados para la amenaza de movimientos en masa se muestra en la Ilustración 51. Se observa que las instalaciones con un nivel de peligrosidad mayor se ubican en las zonas 4 y 6, en los municipios de Bello, Caldas e Itagüí respectivamente

En términos del resultado de condición de riesgo para la amenaza de movimientos en masa, se llevó a cabo un procedimiento similar al realizado con las otras dos amenazas (inundación y avenida torrencial), obteniendo los resultados mostrados en la Ilustración 52. En este caso se tiene que la Cervecería Unión SA tiene un 40% del búfer de 300 metros con una calificación de condición de riesgo Natech CR4 y es la única instalación que reporta una condición de riesgo Natech 5 (CR5) equivalente al 2%. Focalizándose sobre este último resultado (CR5), se puede mencionar que tiene una clasificación de suelo principalmente urbana y que en su mayoría es de tipo residencial o contiene actividades múltiples donde se encuentran equipamientos colectivos o de culto como parroquias, hogares infantiles o escuelas, lo que evidencia una mayor exposición poblacional a la materialización de un evento Natech. Cabe resaltar que esta empresa obtuvo el mayor índice de peligrosidad industrial y que, además, tiene áreas adicionales que se deben contemplar por su cercanía con otras instituciones educativas, zonas forestales de protección o zonas dotacionales e institucionales. Los resultados mostrados en la Ilustración 52 también resaltan a la

Operadora Avícola Colombia S.A.S en dónde un 9% de su búfer se encuentra en condición de riesgo Natech 4 (CR4) y a la empresa Gases de Antioquia S.A. E.S.P que reporta todo su búfer en un nivel de condición de riesgo Natech 3 (CR3).

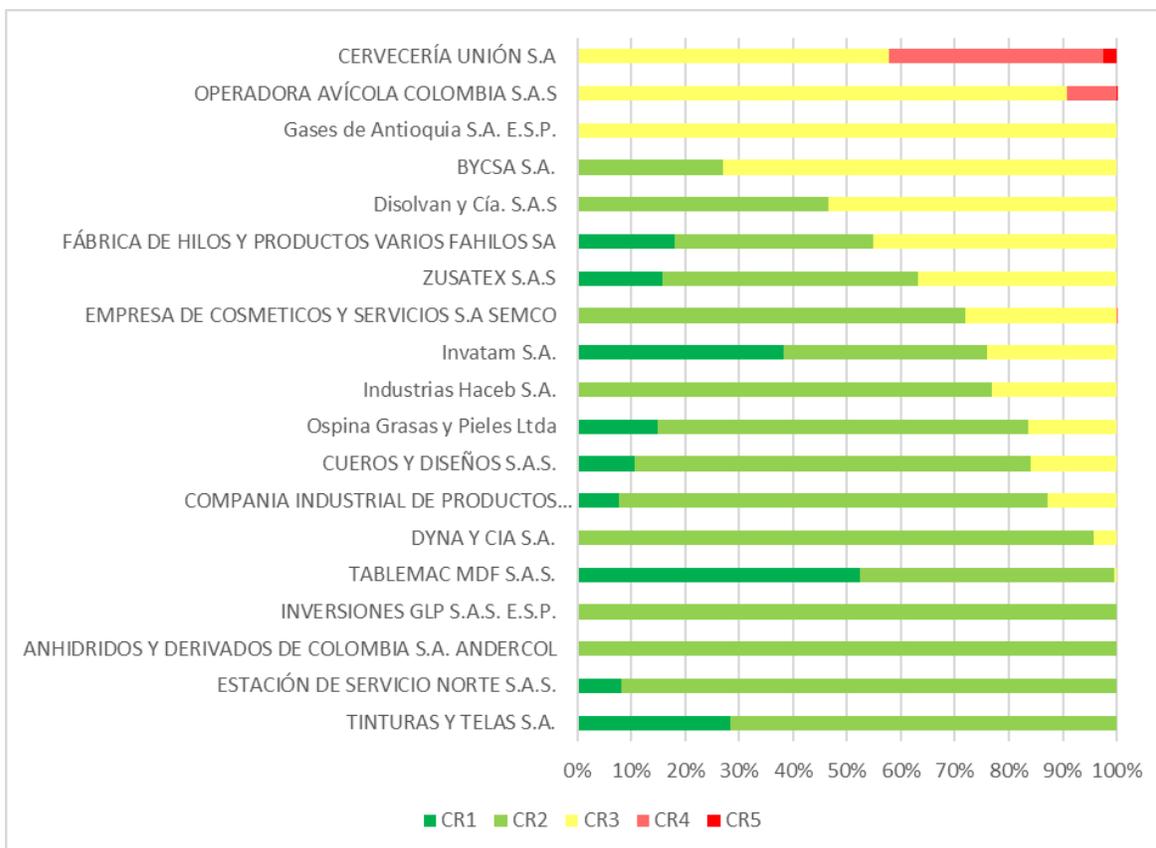


Ilustración 52. Distribución del índice de condición de riesgo obtenido de las áreas alrededor de cada empresa con un búfer de 300 metros para la amenaza de movimiento en masa.

Considerando el análisis por municipio para la amenaza por movimientos en masa, se puede observar que el porcentaje de CR4 en Itagüí aumentó en comparación a lo analizado para las amenazas de inundación y avenida torrencial. Esto ocurre debido a que la proporción de área en esta condición (CR4) es mayor en comparación al total del área generada en los búferes de las instalaciones analizadas para las amenazas de inundación y avenida torrencial, que están ubicadas o tienen incidencia en el municipio de Itagüí. Si miramos en detalle, para las amenazas de inundación y avenida torrencial en el municipio de Itagüí, se contemplaron 18 y 8 instalaciones industriales respectivamente, mientras que en el caso de movimientos en masa sólo se tienen 2 instalaciones, de las cuales su área en condición CR4 es mucho mayor, ejemplo de ello es el caso de la Cervecería Unión S.A. Además, como se mencionó anteriormente, para esta misma instalación se tiene una condición de riesgo Natech 5 (CR5). Con respecto a los demás resultados, se puede mencionar que los municipios de Copacabana y Bello tienen la mayor cantidad de empresas cuyos búferes se encuentran en estos municipios, pero la condición de riesgo no supera el

nivel 3 (CR3). Solamente en el municipio de Caldas se tiene un nivel de condición de riesgo Natech CR4 e inclusive CR5 (0.04%) por la presencia de la empresa Operadora Avícola Colombia S.A.S cerca de una zona residencial con equipamientos educativos.

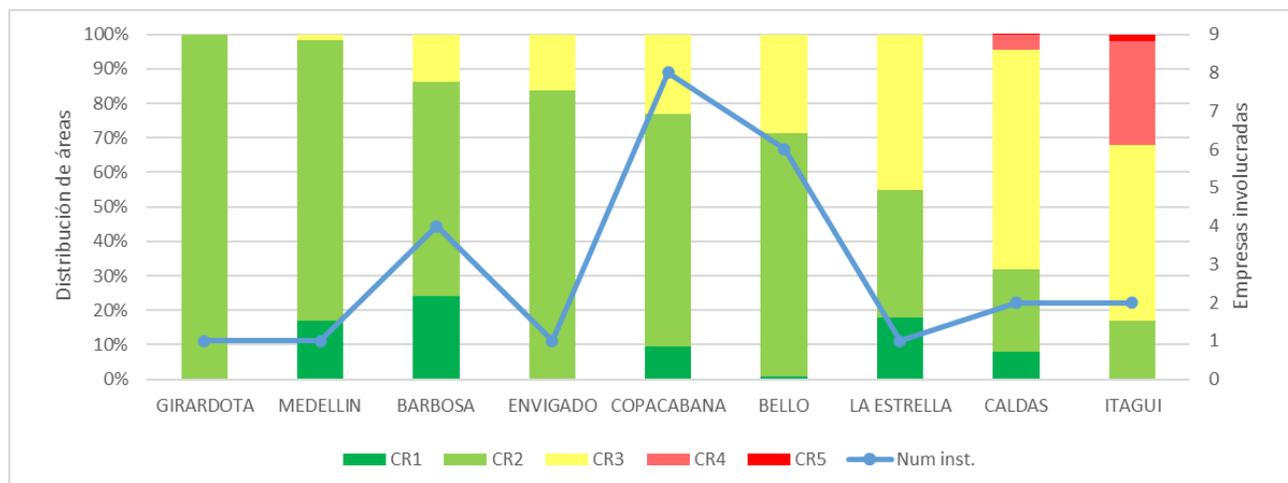


Ilustración 53. Distribución del índice de condición de riesgo de acuerdo con la ubicación del búfer de 300 metros alrededor de cada empresa para la amenaza de movimiento en masa

9. MEDIDAS DE REDUCCIÓN ANTE ESCENARIOS DE RIESGO NATECH

El 2do taller internacional de Investigación, avances y estrategias para la gestión de riesgos Natech permitió obtener aportes de expertos internacionales desde diferentes perspectivas, una de ellas, las medidas de reducción de riesgo Natech implementadas en diferentes latitudes. Estas fueron compartidas por los diferentes expositores en el marco de las lecciones aprendidas y buenas prácticas que se adelantan en otros países. Investigadores referentes como la profesora Ana María Cruz de la Universidad de Kioto en Japón, ingeniera química con doctorado en ingeniería ambiental Alessio Misuri, ingeniero Químico y Bioquímico y candidato a doctor en la Universidad de Bologna en Italia o Elisabeth Krausmann, científica líder del Centro de Investigación Conjunta de la Unión Europea (JRC) y doctora en física de la Universidad Tecnológica de Viena con especialización en física nuclear e ingeniería nuclear, por ejemplo, compartieron las siguientes recomendaciones y reflexiones.

En primer lugar, se debe mencionar que los accidentes Natech van más allá de la ocurrencia de un evento tecnológico, contemplan múltiples fallas que ocurren en muchos casos de manera simultánea, tienen la posibilidad de eventos en cascada y generan impactos significativos a los sistemas de seguridad y servicios básicos. Todos estos elementos hacen que sea necesario implementar una gestión más profunda y compleja que abarque elementos como una perspectiva de área extensa, sea preciso involucrar a entidades de respuesta, autoridades competentes y a la comunidad en pro de reducir posibles afectaciones a las personas o el medioambiente.

En este sentido, se reconoce que los eventos de origen natural tienen una afectación que no es puntual por lo que es de esperarse que este tipo de eventos contemplen muchos eventos en cascada al interior de un complejo industrial y sus alrededores. Dentro de los casos que se pueden mencionar al respecto se encuentra el accidente ocurrido en Shimobara (Japón) en 2018, en el que ocurrió una explosión en una planta de fundición de aluminio luego de una inundación por el desbordamiento de un río aledaño. Esta explosión afectó plantas industriales vecinas y generó proyectiles que dañaron también edificaciones cercanas. Esto, por ejemplo, refleja la necesidad de contemplar medidas particulares para sustancias que reaccionen con el agua como en el caso del aluminio.

Estos eventos en cascada también pueden generar afectaciones en medidas de mitigación de eventos de origen natural, como ocurrió en el caso de Saga (Japón) en 2019. En este caso también hubo una inundación y esta desencadenó una fuga contaminante de un aceite el cual no permitió el posterior drenaje del agua por los sistemas de bombeo de la ciudad. Si bien hubo una evacuación vertical en la que los habitantes se refugiaron en un piso superior, la imposibilidad del drenaje afectó directa e indirectamente a la población al verse aislados y estar expuestos a vapores de una sustancia que generaba una irritación cutánea.

Dentro de las posibles lecciones aprendidas de estos eventos Natech, la profesora Ana María Cruz resaltó: 1) La falta de información sobre eventos potenciales debido a

inundaciones en lugares que involucran industrias de metal. 2) La ausencia o inexistencia de intercambio de información entre industria, autoridades locales, primeros respondientes y la comunidad. 3) Compartir información de riesgo y peligro debe ser el primer paso en la búsqueda de una gobernanza del riesgo. 4) Se debe contemplar los escenarios Natech aun cuando sean muy remotos y propender por una gestión de área extensa.

La profesora Ana María también resaltó algunas de las brechas en la gestión del riesgo Natech

- Los análisis raramente incluyen riesgos sistémicos y eventos en cascada más allá de los límites de la instalación, se debe plantear un análisis de riesgo de área extensa
- Hay brechas entre agencias/organizaciones y entre diseñadores, compañías de construcción y firmas de ingeniería, operadores de proceso, expertos en seguridad, etc. Esto implica que se debe buscar fortalecer un sistema interoperable que busque precisamente mitigar o prevenir posibles afectaciones a las personas y el medio ambiente.
- La gestión del riesgo Natech pueda que no se contemple en la planeación de desastres tanto al interior como al exterior de la compañía. El gobierno, los primeros respondientes y la comunidad pueda que no estén informados o completamente preparados.
- No hay planeación para eventos naturales que exceden los niveles de diseño
- Hay una baja conciencia entre los oficiales de gobierno, tomadores de decisión y operadores industriales acerca de la necesidad de abordar los Natech como casos especiales.

Estas brechas resaltan la necesidad de buscar medidas de reducción no solo desde un aspecto técnico, sino desde un marco de gobernabilidad y gobernanza del riesgo a nivel territorial y como miembros de una sociedad que contemple que los diseños de los equipos, las industrias o infraestructuras son susceptibles a ser sobrepasados y por ende representar un potencial peligro a su alrededor. Como ejemplo se pueden tomar los sistemas de transporte de combustible marítimo (p.ej., buques) o terrestre (p.ej., camiones cisterna) que pueden desencadenar eventos accidentales asociados con desplazamientos por inundaciones, tifones o tsunamis, lo que los convierte en potenciales proyectiles y fuentes de incendios flotantes, según lo dispuesto por la profesora Ana María. Si a esto se le suma que han podido determinar una relación de este tipo de eventos con el cambio climático, se deben abordar medidas más completas y dinámicas. Sobre esto último, se puede tomar lo mencionado por Alessio Misuri asociado a la potencialidad de falla de las barreras de seguridad contemplando escenarios de escalamiento lo que requiere una perspectiva más flexible.

De acuerdo con Elisabeth Krausmann desde el punto de vista de país, se sugiere contar con regulaciones para la reducción de riesgos Natech, implementarlas y hacerlas cumplir. También es importante que, desde el ámbito nacional, se desarrollen herramientas, métodos y lineamientos para para la evaluación de riesgos en la industria y la gestión del riesgo Natech. Es igualmente importante que se desarrollen planes dedicados de gestión

de emergencias Natech. Además, contar con mapas de riesgo Natech que ayuden a guiar los análisis de riesgo y soportar la toma de decisiones para respaldar la planificación eficaz del uso del suelo y la gestión de emergencias, de manera que aborden explícitamente el riesgo Natech. Esto a su vez debe estar acompañado por un aumento de conciencia respecto al riesgo Natech y una comunicación efectiva del mismo, en aras de fortalecer sus mecanismos de reducción. Y finalmente, se sugiere que se capacite a las partes interesadas en la reducción de riesgos Natech, incluyendo a las autoridades competentes en la reducción del riesgo, los funcionarios encargados de la prevención de accidentes químicos y los encargados de la gestión de eventos de origen natural.

Desde el punto de vista del operador, este debe estar encargado de controlar el riesgo Natech en su instalación, de manera que se

- a. Evalúen cuáles eventos de origen natural pueden afectar sus instalaciones.
- b. Consideren las amenazas de origen natural en los análisis de riesgos y en su gestión

Es así como factores como la sensibilización y la mejora continua de la comunicación de riesgos en todos los niveles de gobierno y en la industria son fundamentales para enriquecer los procesos de conocimiento y reducción del riesgo. Este enfoque también debe concebir el nivel comunitario.

Por otra parte, las lecciones aprendidas juegan un papel preponderante para mejorar las medidas de reducción del riesgo Natech. Por lo anterior, se requiere de la recopilación sistemática de datos sobre las causas y la dinámica de los eventos Natech, con el fin de poder contar con análisis de este tipo de eventos ocurridos en el pasado. Su amplia difusión, podrá sumar al aprendizaje de aspectos como los modos de falla, las rutas de liberación de sustancias peligrosas en función de la intensidad de los fenómenos naturales y las medidas de reducción del riesgo más pertinentes, de manera que se puedan identificar las posibles mejores prácticas. Esta visión también permitirá desarrollar indicadores que permitan medir la efectividad y adecuación de las medidas de reducción de riesgo Natech implementadas. En este sentido, además de contemplar medidas de reducción estructurales, también se deben concebir aquellas barreras blandas a través de la educación, con el fin de aumentar la percepción al respecto.

Cabe mencionar que no se requiere necesariamente la ocurrencia de un evento de origen natural de gran magnitud para que se materialice un escenario Natech, estos pueden desencadenarse por cualquier tipo y tamaño de evento natural, por lo que resulta relevante contar con medidas de reducción adecuadas. En este sentido, la prevención, preparación y respuesta diseñadas teniendo en cuenta las características intrínsecas de los escenarios Natech, ayudarán a prevenirlos y mitigar sus consecuencias.

Es así como la evaluación del riesgo Natech para una instalación peligrosa, debe contemplar la ubicación de la instalación y si esta se encuentra en una zona de potencial amenaza natural o no, además de la intensidad de esa amenaza. Esto a su vez se soporta con un subsecuente análisis de las áreas de la instalación que podrían verse afectadas y cuáles podrían ser esas afectaciones, puesto que no todos los equipos son igualmente vulnerables. En este sentido, se deben priorizar los equipos más peligrosos. Este análisis

también debe incluir una evaluación de los posibles impactos de los eventos de origen natural en las medidas de prevención y mitigación implementadas, de manera que se fortalezca la reducción del riesgo mediante medidas de protección específicas (UNISDR, 2017).

Además de lo anterior, también es fundamental que tanto los analistas de riesgo, como los organismos de respuesta a emergencias y las autoridades locales, conozcan las características fisicoquímicas de las sustancias químicas presentes en las instalaciones industriales y su peligrosidad, de manera que se tenga claridad sobre los posibles escenarios finales y cómo mitigarlos. Esto es, incendios, explosiones, contaminación, nube tóxica o reacciones de sustancias químicas con el agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, se revisó el listado de las 88 sustancias químicas peligrosas que contiene el MRQ, de las cuales se ha identificado que 19 reaccionan con el agua. De acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado (SGA), estas sustancias bien sean sólidas o líquidas, en presencia de agua empiezan a desprender vapores inflamables de manera espontánea lo cual representa un peligro adicional al evento inicial. En caso de que se materialice un evento Natech que genere la liberación de dichas sustancias, es importante considerar las cantidades almacenadas en la instalación, de manera que se verifique si representan un gran peligro o si por el contrario podrían diluirse con el agua de inundación. En cualquier caso, el almacenamiento de estas sustancias resulta peligroso y, por lo tanto, para estas sustancias específicamente, se sugiere tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1) Manipulación, almacenamiento y eliminación diferenciada.
- 2) Almacenar en un lugar seco y en recipiente cerrado.
- 3) En caso de que la instalación esté en zona de amenaza por inundación, garantizar que el almacenamiento de estas sustancias esté en un nivel por encima de la altura de inundación esperada.
- 4) Manipular en medio de gas inerte.
- 5) Proteger de la humedad.
- 6) Usar equipo de protección personal adecuado (según especificaciones del proveedor y/o fabricante)
- 7) Contemplar aumentos de temperatura y posible desprendimiento de gases o vapores inflamables o tóxicos.
- 8) Informar a los operarios y equipos de respuesta a emergencias de la reactividad de dichas sustancias (mantener visible y en buen estado las fichas de datos de seguridad)
- 9) En caso de incendio utilizar los medios apropiados según especificaciones en la ficha de seguridad.
- 10) Considere que la liberación de estas sustancias peligrosas puede dificultar las operaciones de búsqueda y rescate.
- 11) Las sustancias químicas liberadas pueden mezclarse y reaccionar con el agua, potencialmente generando productos de reacción tóxicos o un riesgo de incendio o explosión (WHO, 2018)

10. RECOMENDACIONES

El desarrollo metodológico del índice de vulnerabilidad Natech, el índice de peligrosidad industrial, la condición de riesgo Natech, sus variables y componentes, permitió vislumbrar aspectos que deben ser reconocidos como potenciales oportunidades de mejora. Es así como esta sección busca orientar los hallazgos hacia unas recomendaciones que propendan por el fortalecimiento de capacidades ante la gestión del riesgo Natech en el Valle de Aburrá. Las recomendaciones se proponen desde diferentes visiones, soportadas por lecciones aprendidas durante el desarrollo del proyecto y se apoyan en referencias tanto nacionales como internacionales.

10.1 PARA LA INDUSTRIA

Desde el punto de vista de las instalaciones industriales, se recomienda robustecer el conocimiento del riesgo Natech, asociado, por ejemplo, a las sustancias químicas peligrosas que cada instalación procesa, manipula, produce y/o almacena y sus cantidades. Parámetros como el Sistema Globalmente Armonizado, adoptado en Colombia bajo la Resolución 0773 de 2021 permiten tener estándares internacionales sobre la clasificación y la comunicación de peligros de los productos químicos, lo cual contribuye a disminuir la probabilidad de accidentes tecnológicos y velar por la protección y salud de los trabajadores, las instalaciones y el ambiente frente al uso y manejo de estas sustancias.

A su vez, es importante que los responsables de cada instalación industrial que cumpla con los umbrales de sustancias químicas peligrosas dispuestos en el Decreto 1347 de 2021 sobre el Programa de Prevención de Accidentes Mayores, se acojan al mismo, de manera que se adopten sus requerimientos con el fin de reducir la potencial materialización de un accidente mayor. Esto, también se asocia con lo dispuesto en el Decreto 2157, el cual solicita a las entidades públicas y privadas generadoras de riesgo, que realicen sus propios Planes de Gestión del Riesgo de Desastres. Para tal fin, las instalaciones industriales deben conocer tanto el contexto interno como externo de su instalación, identificando las diferentes fuentes de riesgo, incluyendo las amenazas de origen natural presentes en su entorno. Lo anterior, se relaciona directamente con los análisis de riesgos que se realiza en cada instalación, en donde se recomienda considerar los escenarios Natech.

En este sentido también es importante mencionar que para aquellas instalaciones que se encuentran ubicadas en zonas de amenaza de alta intensidad y densidad industrial, se analicen la potencial pérdida de contención, contemplando el tipo de liberación que puede darse, del inventario o volumen de sustancias químicas y sus características fisicoquímicas, de reactividad y peligrosidad. Esto ayudará a poner en perspectiva la posible generación de un efecto dominó.

Por otra parte, se recomienda a los responsables de cada instalación industrial y particularmente a las personas encargadas de la gestión de riesgos, realizar jornadas de capacitación periódicas a todo el personal de la empresa, de manera que estén informados

de los riesgos asociados a la operación y qué hacer en caso de materializarse. Estas capacitaciones deben incluir explicaciones sobre el riesgo Natech y cómo comportarse ante un evento de este tipo.

Las capacitaciones deben extenderse igualmente a los equipos de respuesta a emergencias internos (si los hay) y garantizar que conozcan los procedimientos para la respuesta ante un evento Natech. Aquí resulta relevante que los responsables de la respuesta a emergencias estén capacitados para responder tanto al evento de origen natural como al accidente tecnológico que se presentarían simultáneamente. A su vez, la realización de simulacros es recomendable, en especial para instalaciones industriales ubicadas en zonas de alta densidad industrial, como, por ejemplo, parques industriales.

También se recomienda a las instalaciones industriales tener la información de sus procesos, equipos y sustancias químicas peligrosas actualizada y en orden. Que las fichas de seguridad estén disponibles tanto para los operadores como para los equipos de respuesta a emergencias y que esta información sea compartida con los primeros respondientes, esto es equipos de respuesta a emergencias externos a la empresa (bomberos, defensa civil, Cruz Roja, entre otros).

En caso de que se hayan presentado accidentes industriales en la empresa, se recomienda tener un registro de los mismos, incluyendo las causas, materiales involucrados, consecuencias y afectaciones entre otros. Se sugiere que ese registro interno diferencie los accidentes asociados con Salud y Seguridad en el Trabajo (SST) de aquellos accidentes tecnológicos, accidentes mayores y/o eventos Natech. Estos registros permitirán a las instalaciones industriales robustecer sus medidas de prevención y mitigación con base en las lecciones aprendidas de eventos ocurridos al igual que brindarán información útil para desarrollar sus planes de gestión del riesgo de desastres tal como lo requiere el Decreto 2157.

El índice propuesto en este trabajo reconoció dentro de sus parámetros la densidad industrial de las empresas con sustancias químicas peligrosas y un índice de vulnerabilidad que relacionaba una potencial liberación de material peligroso. Sin embargo, el volumen real dependerá de factores adicionales como la dinámica de pérdida, la dirección de la liberación y de barreras mitigativas que limitan la cantidad final liberada. Esto nuevamente es un indicador que busca describir de manera práctica la potencial pérdida de contención, pero se deben realizar evaluaciones más detalladas.

10.2 PARA LAS AUTORIDADES LOCALES Y LOS TOMADORES DE DECISIONES

Se recomienda caracterizar completamente las amenazas naturales presentes en el territorio, sus periodos de retorno y su intensidad. Esto constituye el primer paso para la gestión del riesgo Natech. Es importante que esta información sea considerada para el ordenamiento y planeación del territorio, de manera que las instalaciones industriales nuevas no sean ubicadas en zonas de amenaza.

De otra parte, el desarrollo del proyecto permitió identificar la necesidad de que los municipios tengan conocimiento sobre los riesgos asociados a las instalaciones industriales presentes en sus territorios y las sustancias peligrosas que estas procesan o almacenan, de manera que se puedan proponer acciones conjuntas de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. A la luz de este trabajo articulado entre las autoridades locales y la industria, se podrá lograr el fortalecimiento de capacidades para la gestión del riesgo Natech y propender por la seguridad de los habitantes y ecosistemas de cada municipio. Acciones conjuntas y esfuerzos sostenidos en este sentido lograrán finalmente mejorar la resiliencia territorial ante los eventos Natech.

Adicionalmente, se recomienda que los territorios tengan mesas de trabajo Natech que involucren a todos los actores relacionados con este riesgo, esto es autoridad local, industria, comunidad y academia, de manera que se puedan construir conjuntamente mecanismos de conocimiento y reducción del riesgo Natech. Bajo esta óptica, se recomienda al AMVA liderar la iniciativa creando la mesa técnica Natech del Valle de Aburrá, la cual podrá tener subcomités municipales que se interrelacionen con el Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo, de manera que se garantice la articulación con los procesos de la GRD.

10.3 PARA LAS ENTIDADES DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

Se recomienda fortalecer el conocimiento de riesgo Natech para los primeros respondientes. Esto incluye jornadas de capacitación, de discusión y de relacionamiento para profundizar en temas asociados a las características de los eventos Natech y cómo responder ante ellos. Esto repercute en un aumento de la concientización del riesgo Natech y en el fortalecimiento de capacidades de los equipos de respuesta.

Es importante también que se conciba la comunicación con las diferentes partes interesadas como un elemento fundamental para la gestión del riesgo Natech. Conocer las sustancias químicas presentes en las instalaciones, sus características fisicoquímicas reactividad y peligrosidad son cruciales a la hora de atender efectivamente una emergencia de esta naturaleza.

Teniendo en cuenta lo anterior, para los primeros respondientes y especialmente para aquellos localizados en municipios con una mayor presencia de instalaciones industriales sujetas a diferentes niveles de amenaza de origen natural, se recomienda contar con equipos de respuesta acordes con los escenarios Natech que potencialmente se pueden materializar. Esto quiere decir que se requiere un conocimiento de dichos escenarios por parte de los primeros respondientes, lo que implica la necesidad de tener una articulación entre estos y la industria.

Además, se sugiere hacer simulacros tanto para responder a un accidente tecnológico como para un evento Natech, estos últimos con una periodicidad más amplia, de manera que se pueda evaluar la preparación de las entidades de respuesta a emergencias ante estos accidentes industriales.

10.4 RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL AMVA

Con base en los procesos de la Gestión del Riesgo de Desastre (GRD) conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, se plantean las siguientes recomendaciones que involucran diferentes actores y niveles de gestión. Así mismo, se contempla la necesidad de conocer los peligros de las sustancias, elemento que ya se venía adelantando con el Mapa de Riesgo Químico (MRQ) y que se debe potenciar dentro de los procesos de formación del personal de las industrias. También se requiere reconocer cuáles son las medidas de seguridad para prevenir una liberación de material tanto a nivel técnico como de gestión y, qué tan preparados se encuentran tanto la empresa como los organismos de respuesta a emergencia frente a un evento de este Natech. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantean las siguientes consideraciones según los niveles del índice de condición de riesgo.

Condición de riesgo CR4 o CR5:

Las instalaciones con esta condición de riesgo son aquellas que requieren un mayor nivel de detalle en sus análisis y sobre las que se debe hacer un seguimiento continuo tanto de eventos amenazantes por los fenómenos de origen natural abordados en este trabajo, como de las medidas de prevención y mitigación disponibles.

- **Conocimiento del riesgo:** Se recomienda implementar un nivel de Gestión 1 reportado en el MRQ correspondiente a visitas anuales de la empresa por parte del AMVA, acompañado de un proceso de formación del personal recurrente de la instalación involucrada según lo dispuesto en el Decreto 1347 de 2021. El proceso de formación debe focalizarse en la gestión de sustancias peligrosas (p.ej., identificación, comunicación, manipulación y transporte), principios de seguridad de procesos y alertas de condiciones amenazantes por fenómenos de origen natural. Tomando en cuenta lo descrito en este Decreto se recomienda actualizar de manera continua los inventarios de material peligroso y determinar si la instalación se debe clasificar según los umbrales reportados en el PPAM. De igual manera, es importante que se realicen los estudios de amenaza de detalle, para identificar de manera específica para estas empresas o áreas industriales los valores de intensidad de las amenazas a las cuales se encuentran expuestas.
- **Reducción del riesgo:** El proceso de conocimiento del riesgo debe ir acompañado de un seguimiento y revisión de condiciones amenazantes en las instalaciones con condición de riesgo Natech CR4 y CR5. Se recomienda establecer una comunicación estrecha entre las instalaciones y las entidades municipales o territoriales encargadas de los Sistemas de Alertas Tempranas (SAT). Por parte de la empresa se debe hacer una identificación y revisión de posibles barreras de seguridad que buscan prevenir o mitigar una liberación de material peligroso y posibles eventos finales como incendios, explosiones, o contaminaciones tanto de una perspectiva técnico-operativa como desde un aspecto gerencial. Para ello, se pueden contemplar niveles de falla de barreras existentes, evaluar la pertinencia de usar sistemas de apoyo o elementos redundantes. También hacer uso de aproximaciones que aborden perspectivas basadas en riesgo de análisis de

vulnerabilidad por eventos naturales como el reportado por Misuri, Landucci, Vivarelli, Bonvicini, & Cozzani, 2019. En la revisión de los POTs metropolitanos, se debe incluir la condición de riesgo Natech CR4 y CR5. De igual manera, es importante que desde el ordenamiento territorial se controlen las densidades residenciales en el entorno de empresas con esta condición de riesgo, al igual que el desarrollo de equipamientos que impliquen permanencia prolongada de personas, como pueden ser los de salud y educativos. Los existentes deberán contemplar las distancias de aislamiento y evacuación dispuestas en el mapa de riesgo químico del AMVA. En caso de que las empresas en esta condición de riesgo se encuentren en suelos rurales o usos con bajas densidades, es conveniente que se conserve esta condición en el momento de la revisión de los POTs metropolitanos. Producto de los estudios de detalle de la amenaza y del análisis y evaluación de riesgo de las instalaciones industriales (de acuerdo con requerimientos del decreto 2157 de 2017) se deberán realizar las medidas de reducción estructurales y no estructurales pertinentes.

- **Manejo de desastres:** Las instalaciones que tengan esta condición de riesgo requieren una mayor conciencia por parte de las entidades de respuesta a emergencias sobre los peligros de las sustancias involucradas. Lo anterior dado el nivel de exposición y el índice de peligrosidad de la instalación. Se recomienda contemplar estudios que identifiquen posibles niveles de afectación y procuren medidas de intervención preventiva o correctiva por una posible liberación de material peligroso, que se revisen posibles planes de emergencia que involucren la evacuación de personal expuesto y la identificación de equipamientos con un mayor nivel de vulnerabilidad como entidades educativas o de salud sobre las que se debe hacer foco.

Condición de riesgo Natech CR3:

Las instalaciones con esta condición de riesgo son aquellas que requieren un monitoreo coordinado de eventos amenazantes por los fenómenos de origen natural abordados en este trabajo, así como de una identificación de medidas de prevención y mitigación disponibles.

- **Conocimiento del riesgo:** Se recomienda implementar un nivel de Gestión 2 reportado en el MRQ, en el que se proponen visitas cada dos años a la empresa por parte del AMVA, acompañado de un proceso de formación del personal en gestión de sustancias peligrosas (p.ej., identificación, comunicación, manipulación y transporte) y reconocimiento de condiciones amenazantes por fenómenos de origen natural para la instalación.
- **Reducción del riesgo:** Se debe contemplar un proceso de reconocimiento del estado de las barreras de seguridad disponibles para prevenir o mitigar una liberación de material peligroso. Esta revisión debe ser reportada en las visitas bianuales por parte del AMVA, en las que se busca también actualizar los inventarios de material peligroso e indagar si las empresas están clasificadas según lo dispuesto en el PPAM (Decreto 1347 de 2021). En este caso se debería hacer mayor foco en los procesos de gestión del cambio, integridad mecánica y procedimientos de

operación. Esta información se puede complementar con aproximaciones que aborden perspectivas basadas en riesgo de análisis de vulnerabilidad por eventos naturales como el reportado por Misuri et al. (2019), si se considera pertinente dentro del proceso de reconocimiento de barreras. Es importante la realización de estudios de detalle que determinen la intensidad de las amenazas a las que están expuestas las instalaciones industriales. Se recomienda que la construcción de nuevos equipamientos que impliquen permanencia prolongado de personas, como pueden ser los de salud y educativos guarden distancias de seguridad a las industrias. Los existentes deberán contemplar las distancias de aislamiento y evacuación dispuestas en el mapa de riesgo químico del AMVA.

- Manejo de desastres: Las instalaciones que tengan esta condición de riesgo requieren propender por una comunicación y coordinación con las entidades de atención de respuesta y emergencias sobre sus Planes de Emergencia y Contingencias (PEC). Un nivel intermedio de condición de riesgo implica que no tiene una gran cantidad de equipamientos expuestos, pero podría estar en un área colindante con una condición CR4 o CR5. Se recomienda revisar estudios complementarios que aborden un posible impacto ambiental en concordancia con los Planes de GRD municipales.

Condición de riesgo Natech CR1 o CR2:

Las instalaciones con esta condición de riesgo son aquellas que requieren un monitoreo parcial de eventos amenazantes por los fenómenos de origen natural abordados en este trabajo, así como de las medidas de prevención y mitigación disponibles.

- Conocimiento del riesgo: Se recomienda implementar un nivel de Gestión 3 reportado en el MRQ, en el que proponía una recurrencia de visitas de la industria por parte del AMVA cada 3 años. Si bien estas instalaciones tienen un nivel menor a intermedio de exposición, el nivel de peligrosidad puede ser inclusive intermedio-mayor, lo que implica que se debe hacer también un proceso de identificación de peligros y formación del personal sobre condiciones seguras de operación. Esta información junto al nivel de inventario y condición de los equipos se debe reportar en las visitas realizadas por el AMVA.
- Reducción del riesgo: Al igual que en los casos anteriores, se debe contemplar un proceso de revisión y pertinencia de las barreras de seguridad de la instalación. Se recomienda realizar una revisión de lecciones aprendidas de eventos ocurridos en otras empresas del Valle de Aburrá en conjunto con el AMVA, así como estudios complementarios sobre posible afectación ambiental a ser reportada en la revisión trianual. Dentro del Sistema de Gestión se debe hacer foco en auditorías de cumplimiento, gestión del cambio y procesos de participación sobre los sistemas de seguridad y operación segura.
- Manejo de desastres: Las instalaciones que tengan esta condición de riesgo requieren propender por una comunicación y coordinación con las entidades de atención de respuesta y emergencias sobre el nivel de peligrosidad de sus sustancias. Para este caso el nivel de exposición es menor a intermedio, lo que implica que no son necesarios procesos de evacuación, pero las instalaciones en

condición de riesgo Natech CR1 y/o CR2, podrían estar en un área colindante con una condición CR4 o CR5 que sí los requiera. Se recomienda revisar estudios complementarios que aborden un posible impacto ambiental en concordancia con los Planes de GRD municipales

Adicional a lo mencionado anteriormente, se presentan algunas recomendaciones generales y sugerencias para el AMVA, con base en los hallazgos durante el desarrollo del presente proyecto.

- Realizar estudios históricos de eventos naturales ocurridos en el Valle de Aburrá para robustecer el retorno de experiencias y mejorar los análisis de riesgo Natech, de manera que se pueda contar con datos más precisos que soporten la construcción de curvas de fragilidad, periodos de retorno, entre otros.
- Complementar información de amenaza para los municipios de Medellín, Girardota, Sabaneta y La Estrella, para aplicar la metodología a todas las industrias presentes en el Valle Aburrá.
- Terminar de caracterizar a las instalaciones industriales presentes en el Valle de Aburrá.
- Se recomienda llevar a cabo un proceso de identificación de escenarios de riesgo en cada empresa, contemplando un proceso de valoración cualitativa en aquellas instalaciones con una mayor condición de riesgo. Este proceso de identificación y valoración debería ser compartido con el AMVA y la entidad municipal correspondiente, con el fin de soportar la toma decisiones en caso de una emergencia en el marco de los Planes de GRD Departamental y Municipales, así como lo dispuesto para el ordenamiento territorial.
- La investigación debe continuar para buscar datos más detallados que permitan identificar industrias vulnerables ante potenciales eventos Natech y así continuar desarrollando iniciativas que fortalezcan la gestión del riesgo Natech en el territorio. Para ello se propone desarrollar formatos de captura de información que incluyan (equipos, inventario por equipo, localización de equipos, descripción detallada de barreras de seguridad (incluyendo blandas), entre otros. Considerando el proceso de elaboración del presente proyecto, este tipo de información puede enriquecer el análisis y robustecer los resultados obtenidos hasta el momento.
- En la medida que surjan nuevos estudios de vulnerabilidad de equipos de procesos frente a diferentes amenazas de origen natural, se recomienda robustecer la metodología propuesta
- Se recomienda crear un repositorio de información de accidentes tecnológicos y Natech para el AMVA, sistematizado con emergencias de bomberos y entidades de respuesta a emergencia por municipio.
- Una vez se haya avanzado un poco más en el conocimiento del riesgo Natech en el Valle de Aburrá, se haya fortalecido la conciencia del riesgo Natech de los primeros respondientes, las industrias y las autoridades locales, así como de la comunidad, se recomienda realizar un simulacro en el Valle de Aburra sobre un evento Natech que sea lo más realista posible, de manera que se pueda poner a prueba el sistema

de respuesta a emergencias de los diferentes municipios y cómo se articulan los diferentes actores en el territorio.

11. CONCLUSIONES

La metodología propuesta por la Universidad EAFIT para la determinación de índices de vulnerabilidad ante escenarios Natech para su inclusión en la gestión territorial del AMVA constituye un aporte importante para la gestión del riesgo de desastres en el territorio, en el marco de lo establecido en la Ley 1523. Adicionalmente, con esta iniciativa el AMVA se consolida como una entidad pionera en Colombia en la construcción de herramientas para robustecer la gestión del riesgo Natech en el país.

Como se presentó a lo largo del documento, la metodología caracteriza las amenazas de inundación, avenida torrencial y movimientos en masa en los municipios del Valle de Aburrá que tienen información completa para tal fin. Al combinar ésta con la estimación del índice de peligrosidad industrial y con el nivel de potencial exposición, se determina el índice de condición de riesgo Natech en el territorio, brindando información importante para los tomadores de decisiones y para las industrias vulnerables a las diferentes amenazas evaluadas. Es así, como la metodología logra incorporar una visión más holística del riesgo Natech, toda vez que se circunscribe la interacción de las instalaciones industriales con su entorno. De esta forma, dicha metodología se convierte en una herramienta que soporta la toma de decisiones para los municipios del Valle de Aburrá y particularmente para el AMVA. Sin embargo, se deben considerar las limitaciones de esta, que no constituyen otra cosa que una oportunidad de seguir ahondando y nutriendo el análisis de potenciales eventos Natech en el Valle de Aburrá. Es así como la condición de riesgo Natech (CR) puede ser utilizada como información indicativa para identificar áreas que requieren análisis más detallados.

Una vez implementada la metodología, los resultados obtenidos destacan a los municipios de Itagüí, Barbosa, Bello y Caldas. Respecto al índice de peligrosidad industrial se encuentra que, para las amenazas de inundación y avenida torrencial, las empresas con un mayor índice son PROQUIMCOL (Barbosa) y Colombina (Itagüí), resaltando que estas dos empresas se encuentran expuestas a las dos amenazas mencionadas. Desde el punto de vista de los movimientos en masa, las empresas con un mayor índice de peligrosidad industrial son Gases de Antioquia S.A. E.S.P. (Bello), Cervecería Unión S.A (Itagüí) y Operadora Avícola Colombia S.A.S (Caldas). Cabe resaltar que este índice de peligrosidad industrial se compone del nivel de peligrosidad de los equipos, de las sustancias, del índice de densidad industrial y del índice de vulnerabilidad Natech. Es así como estos resultados reflejan la contribución que cada una de estas variables tiene sobre la peligrosidad industrial. Particularmente, el índice de vulnerabilidad Natech se refiere al potencial de liberación de las sustancias químicas peligrosas presentes en una instalación industrial, dada una amenaza de origen natural. Bajo este enfoque se evidencia que la empresa Colombina registra el mayor índice de vulnerabilidad Natech ante las amenazas de inundación y avenida torrencial, lo que sugiere que esta empresa es más proclive a una liberación de materiales peligrosos dada una amenaza alta de inundación y media de avenida torrencial. Respecto a los movimientos en masa, la empresa que reporta un mayor índice de vulnerabilidad Natech es Gases de Antioquia S.A. E.S.P. dada una amenaza alta.

Respecto a la condición de riesgo Natech, que recoge las contribuciones de todas las variables previamente mencionadas, más aquella del nivel de potencial exposición, se encontró que los municipios de Itagüí, Barbosa y Caldas son aquellos con un nivel de condición de riesgo Natech más alto (CR4-CR5), evidenciado la necesidad de priorizar acciones para la reducción del riesgo Natech en dichos municipios y especialmente en las instalaciones industriales más expuestas a la materialización del evento accidental. Particularmente para el municipio de Itagüí se contemplaron 31 empresas, en contraposición con los municipios de Barbosa (6) y Caldas (2), de acuerdo con la información del MRQ. Como se observa, el municipio de Itagüí es el que tiene una mayor presencia de instalaciones industriales, lo que a su vez repercute en una probabilidad más alta de que se pueda materializar un evento Natech según el nivel de amenaza. Esto a su vez se realza al considerar que la empresa Colombina también se ubica en este municipio. Lo anterior también se evidencia con los hallazgos durante la revisión de la información suministrada por el AMVA respecto a los eventos tecnológicos atendidos, encontrando que para el municipio de Itagüí este número asciende a 12 eventos, representando alrededor del 35% de los registros.

Como se observa, la metodología propuesta es versátil puesto que los resultados que arroja pueden ser analizados desde diferentes perspectivas, soportando la toma de decisiones de los analistas de riesgo. Esta metodología finalmente se consolida como una herramienta fundamental para identificar zonas propensas a la materialización de eventos Natech, guiando así mismo la implementación de medidas de reducción de riesgo en el territorio.

GLOSARIO

Accidente mayor: todo acontecimiento repentino, como una emisión, un incendio o una explosión de gran magnitud, en el curso de una actividad en una instalación clasificada y que trascienda su perímetro, en el que estén implicadas una o varias sustancias químicas peligrosas y que exponga a los trabajadores, a la población, a los bienes, a la infraestructura o al ambiente a un peligro grave, inmediato o diferido. Un accidente mayor puede constituir un escenario de desastre, siempre y cuando cumpla con la generación de una afectación intensa, grave y extendida sobre las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad (Decreto 1347 de 2021).

Accidente tecnológico: eventos generados por el uso y acceso a la tecnología, originados por eventos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación. Comprende fugas, derrames, incendios y explosiones asociados a la liberación súbita de sustancias y/o energías con características de peligrosidad. (UNGRD, 2017).

Amenaza Antrópica: peligro latente generado por la actividad humana en la producción, distribución, transporte, consumo de bienes y servicios, y, por último, en la construcción y uso de infraestructura. Comprenden una gama amplia de peligros como lo son las distintas formas de contaminación de aguas, aire y suelos, los incendios, las explosiones, los derrames de sustancias tóxicas, los accidentes en los sistemas de transporte, la ruptura de presas de retención de agua, etc (Lavell, 2007). Dentro de las amenazas antrópicas estudiadas en gestión de riesgos de desastres se tienen aquellas de origen no intencional como las aglomeraciones de público o las asonadas. Dentro de las amenazas antrópicas intencionales se tienen, por ejemplo, los atentados terroristas, los sabotajes, el robo de información o de activos y el vandalismo. Estas últimas son amenazas premeditadas “que, en términos generales, no hacen” parte del estudio de la gestión del riesgo de desastres, en tanto que se estudian desde el campo de las teorías y políticas de seguridad pública y de defensa.

Amenaza de origen natural: peligro latente asociado con la posible manifestación de un fenómeno físico cuya génesis se encuentra totalmente en los procesos naturales de transformación y modificación de la tierra y el ambiente; por ejemplo: un terremoto, una erupción volcánica, un tsunami o un huracán y que puede resultar en la muerte o lesiones a seres vivos, daños materiales o interrupción de la actividad social y económica en general. Suelen clasificarse de acuerdo con sus orígenes terrestres, atmosféricos, o biológicos (en la biosfera) permitiendo identificar entre otras, amenazas geológicas, geomorfológicas, climatológicas, hidrometeorológicas, oceánicas y bióticas (Lavell, 2007).

Amenaza socio-natural: peligro latente asociado con la probable ocurrencia de fenómenos físicos cuya existencia, intensidad o recurrencia se relaciona con procesos de degradación o transformación ambiental y/o de intervención humana en los ecosistemas. Algunos ejemplos de estos pueden encontrarse en inundaciones y deslizamientos resultantes (de, o incrementados o influenciados en su intensidad) por procesos de deforestación y deterioro de cuencas, erosión costera por la destrucción de

manglares e inundaciones urbanas por falta de adecuados sistemas de drenaje de aguas pluviales, entre otros. Las amenazas socio-naturales se crean en la intersección del ambiente natural con la acción humana y representan un proceso de conversión de recursos naturales en amenazas. Los cambios en el ambiente y las nuevas amenazas que se generan con el Cambio Climático Global son el ejemplo más extremo de la noción de amenaza socio-natural. Las amenazas socio-naturales mimetizan o asumen las mismas características que diversas amenazas naturales (Lavell, 2007).

Amenaza Tecnológica: amenaza relacionada con accidentes tecnológicos o industriales, procedimientos peligrosos, fallos de infraestructura o de ciertas actividades humanas, que pueden causar muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Ejemplos: incluyen la contaminación industrial, descargas nucleares y radioactividad, desechos tóxicos, ruptura de presas, explosiones e incendios (Lavell, 2007).

Amenaza: peligro latente de que un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ley 1523 de 2012).

Amenazas concatenadas o complejas: la probable ocurrencia de una serie o secuencia de dos o más fenómenos físicos peligrosos donde uno desencadena el otro, sucesivamente como efecto dominó. Un ejemplo se encuentra en la forma en que un sismo puede causar la ruptura de presas y diques, generando inundaciones que rompen líneas de transmisión de productos volátiles o contaminantes con repercusiones directas en los seres humanos u otras especies de fauna o flora (Lavell, 2007).

Análisis de riesgo: proceso de comprender la naturaleza del riesgo para determinar el nivel, es la base para la evaluación de riesgos y las decisiones sobre las medidas de reducción del riesgo y preparación para la respuesta. Incluye la estimación del riesgo (ISO, 2011).

Anotación: texto de mapa que incluye las propiedades para la forma en que se representa el texto. Por ejemplo, además de la cadena de texto de cada anotación, se incluyen otras propiedades tales como los puntos de forma para colocar el texto, la fuente y el tamaño de punto y otras propiedades de visualización. La anotación también puede estar vinculada a la entidad y puede contener subclases. (ESRI, 2020).

Áreas con condición de amenaza: son las zonas o áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo (Decreto 1807 de 2014).

Áreas con condición de riesgo: corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos (Decreto 1807 de 2014).

Avenidas torrenciales: Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor que 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada (Hunger, et. al. 2001). Es uno de los movimientos en masa más peligrosos debido a sus características de ocurrencia súbita, altas velocidades y grandes distancias de viaje.

Base de datos (Geodatabase, GDB): Es un conjunto de datos organizados de tal manera que sean útiles en aplicaciones de sistemas de información geográfica (SIG), y de esta manera permitan su gestión tomando como punto de partida los criterios espaciales para la gestión de la información geográfica (IGAC, 2016).

Buffer: Crea polígonos de zona de influencia alrededor de entidades de entrada a una distancia especificada. (ESRI, 2020).

Cambio climático: Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras (Ley 1523 de 2012).

Campo: La información tabular está constituida por filas y columnas, y todas las filas tienen las mismas columnas. Para Arcgis, las filas se denominan registros y las columnas, campos. Cada campo de una tabla puede almacenar un tipo de datos específico, como un número, una fecha o un fragmento de texto. Por tanto, los campos contienen la información de atributos para cualquier capa del mapa o de una tabla independiente (Ruiz & Arango, 2009).

Caracterización de escenarios de riesgo: es el proceso que busca conocer de manera general, las condiciones de riesgo de un territorio, enfatizando en sus causas y actores e identificando los principales factores influyentes, los daños y pérdidas que pueden presentarse, y todas las medidas posibles que podrían aplicarse para su manejo (UNGRD, 2017).

Clases de entidad o FeatureClass: Es una colección de entidades geográficas que tiene el mismo tipo de geometría (punto, línea o polígono), los mismos campos de atributo para un área común y la misma referencia espacial. Los feature class se pueden almacenar en geodatabases, shapefiles, coberturas, u otros formatos de datos (Ruiz & Arango, 2009).

Conocimiento del riesgo de desastres: entendido como el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes, y la comunicación para promover una mayor conciencia del mismo que alimenta los procesos de reducción del riesgo y del manejo de desastre (Ley 1523 de 2012).

Daño: Manifestación física de un fenómeno no deseado (i.e. resultado físico adverso) en un elemento dado. Por ejemplo, agrietamiento, deformación permanente en infraestructura, edificaciones, equipos, etc. El término puede extenderse a sistemas sociales o económicos, pero en general, no es equivalente a una pérdida. Ver diferencia con pérdida.

Derrame: Pérdida de contención accidental de una materia en estado líquido (UNGRD, 2017).

Desastre: es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales; causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción (Ley 1523 de 2012).

Efecto dominó: un conjunto correlativo de sucesos en los que las consecuencias de un accidente previo se ven incrementadas por éstos, tanto espacial como temporalmente, generando un accidente grave (W. H. Heinrich, 1931).

Emergencia (en riesgo de desastres): situación caracterizada por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad, causada por un evento adverso o por la inminencia del mismo, que obliga a una reacción inmediata y que requiere la respuesta de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general (Ley 1523 de 2012).

Escenario de riesgo: son fragmentos o campos delimitados de las condiciones de riesgo del territorio presentes o futuras, que facilitan tanto la comprensión y priorización de los problemas como la formulación y ejecución de las acciones de intervención requeridas. Un escenario de riesgo se representa por medio de la caracterización y/o análisis de los factores de riesgo, sus causas, la relación entre las causas, los actores causales, el tipo y nivel de daños que se pueden presentar, la identificación de los principales factores que requieren intervención, así como las medidas posibles a aplicar y los actores públicos y privados que deben intervenir en la planeación, ejecución y control de las líneas de acción (UNGRD, 2017).

Estrategia de respuesta a emergencias (ETRE): Es el marco de actuación de las entidades del Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres para la reacción y atención de emergencias. Se refiere a todos los aspectos que deben activarse por las entidades en forma individual y colectiva con el propósito de ejecutar la respuesta a emergencias de manera oportuna y efectiva (UNGRD, 2017).

Estudios detallados: están orientados a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes (Decreto 1807 de 2014).

Evaluación de riesgos: proceso de comparación de los resultados de análisis de riesgos con criterios de riesgo para determinar si el riesgo y/o su magnitud es aceptable, el cual ayuda a la decisión sobre las medidas de reducción del riesgo a implementar (ISO/IEC, 2009).

Evento mayor: Aquel generado durante el funcionamiento de cualquier actividad que suponga consecuencias importantes para las personas, los bienes, la infraestructura,

los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, dentro o fuera del establecimiento, que sobrepasen la capacidad de respuesta interna o los que requiera la intervención de dos o más entidades del Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre (Resolución 1770 de 2013).

Evento: se refiere a la presencia o cambio en un conjunto particular de circunstancias (ISO, 2011). Un evento puede ser el resultado de las consecuencias no deseadas sobre la operación, el personal, la comunidad y/o el medio ambiente. (ISO/IEC Guide 73:2009).

Eventos Natech: accidentes tecnológicos desencadenados por eventos de origen natural, que implican la liberación de materiales peligrosos. Se consideran eventos de alta consecuencia y baja probabilidad, que pueden generar afectaciones a gran escala (Cruz and Suarez, 2019., Showalter and Myers, 1994).

Exposición (elementos expuestos): se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012).

Feature Dataset: Es una colección de clases de entidad relacionadas que comparten un sistema de coordenadas común (Ruiz & Arango, 2009).

Fragilidad: Resistencia de un elemento físico, social, o económico a sufrir daños dado una intensidad de un fenómeno. Metodológicamente se expresa por una relación entre la intensidad de un fenómeno y la probabilidad de daño, mediante una “curva de fragilidad” (relación intensidad-daño). Es un componente de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, pero no involucra la pérdida, solamente el daño.

Frecuencia: Número de eventos por una unidad de tiempo definida (ISO/IEC, 2009).

Fuente de riesgo: elemento que solo o en combinación tiene el potencial intrínseco de originar un riesgo (ISO, 2011).

Fuga: Pérdida de contención accidental de un material en estado gaseoso o vapor (UNGRD, 2017).

Gestión del riesgo: proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Ley 1523 de 2012).

Incendio estructural: Se relacionan con incendios urbanos y rurales e industriales, diferentes a incendios de la cobertura vegetal o forestal (OSSO & LA RED, 2009).

Incendio: Oxidación exotérmica rápida de un material combustible en estado de ignición. El material se puede encontrar en estado sólido, líquido o vapor (Crowl, 2002).

Incidente: cualquier acontecimiento repentino que implique la presencia de una o varias sustancias peligrosas y que, de no ser por efectos, acciones o sistemas atenuantes, podría haber derivado en un accidente mayor (Decreto 1347 de 2021).

Instalaciones vitales: Las estructuras físicas, instalaciones técnicas y sistemas principales que son social, económica u operativamente esenciales para el funcionamiento de una sociedad o comunidad, tanto en circunstancias habituales como extremas durante una emergencia (UNISDR, 2009).

Inundación: Acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas). Se presentan debido a que los cauces de escorrentía superan la capacidad de retención e infiltración del suelo y/o la capacidad de transporte de los canales. Las inundaciones son eventos propios y periódicos de la dinámica natural de las cuencas hidrográficas. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial, por oleaje y encharcamiento (UNGRD, 2017).

Líneas: representan la forma y la ubicación de objetos geográficos, tales como centros de línea de calle y arroyos, también, demasiado angostos para mostrarlos como áreas. Las líneas también se utilizan para representar las entidades que tienen longitud, pero no área, tales como las líneas de curvas de nivel y los límites. (ESRI, 2020).

Manejo de desastres: es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación posdesastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación, entiéndase: rehabilitación y recuperación (Ley 1523 de 2012).

Metadato: Son los datos acerca del contenido, calidad, condición y otras características relacionadas con los datos. Para este manual específicamente los metadatos serán construidos según lo establecido en Norma la Técnica Colombiana 4611 (AMVA, 2007).

Mitigación del riesgo: medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente (Ley 1523 de 2012).

Modelo de datos geográfico: Abstracción del mundo real que emplea un conjunto de datos y objetos que soportan ser desplegados como un mapa, consultas, edición y análisis. En un SIG, la forma en que se decida desplegar y analizar la información depende del modelo geográfico que se emplea para representar el mundo real. (ESRI, 2020).

Movimientos en masa: todo movimiento ladero abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Algunos movimientos en masa son lentos, a veces imperceptibles y difusos; en tanto que otros pueden desarrollar velocidades altas. Los principales tipos de movimientos en masa comprenden caídas, deslizamientos, reptación, flujos y propagación lateral (UNGRD, 2017).

Nube de vapor (o inflamable): Masa de vapor inflamable dentro de una nube de vapor, la cual hará combustión al entrar en contacto con una fuente de ignición (CCPS, 2000).

Ordenamiento territorial: el ordenamiento del territorio municipal y distrital comprende un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, emprendidas por los municipios o distritos y áreas metropolitanas, en ejercicio de la función pública que les compete, dentro de los límites fijados por la Constitución y las leyes, en orden a disponer de instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales (Ley 388 de 1997).

Peligro: característica química o física intrínseca de una sustancia peligrosa o una manifestación de energía, con el potencial de causar daño a la salud de los trabajadores, la población, el ambiente o la infraestructura (Decreto 1347 de 2021).

Pérdida: Cuantificación en términos sociales o económicos del daño, e.g. valor monetario del daño.

Polígonos: un conjunto de entidades de área de muchos lados que representa la forma y la ubicación de los tipos de entidades homogéneas tales como estados, condados, parcelas, tipos de suelo y zonas de uso del suelo. (ESRI, 2020).

Prevención de riesgo: medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible. (Ley 1523 de 2012).

Puntos: entidades que son demasiado pequeñas para representarse como líneas o polígonos, así como también como ubicaciones de puntos (tales como las observaciones del GPS). (ESRI, 2020).

Reducción del riesgo (de desastres): es el proceso de la gestión del riesgo, está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevo riesgo en el territorio, entiéndase: prevención del riesgo. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera (Ley 1523 de 2012).

Riesgo de Desastres: corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012).

Riesgo Tecnológico: daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos generados por el uso y acceso a la tecnología, originados en sucesos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación (UNGRD, Resolución 1770 de 2013).

Riesgo: efecto de la incertidumbre sobre el logro de los objetivos (ISO, 2011).

Shapefile: Es un formato de representación vectorial desarrollado por ESRI. Consta de un número de variables de archivos, que va desde 3 hasta ocho archivos independientes. Cada uno de estos archivos tiene una función específica y almacena un tipo de información (elementos geométricos, atributos, proyección, metadatos, etc.). Cuando se manipulen tales archivos es mejor realizarlo con software especializado con el cual se pueda importar o exportar fácilmente, sin tener que copiar los archivos que lo componen (Ruiz & Arango, 2009).

Sistema de coordenadas: es un marco de referencia que define la posición de las entidades en un espacio bidimensional o tridimensional. Los sistemas de coordenadas pueden ser horizontales, para definir donde están ubicadas las entidades en el globo, o verticales, para definir la altura o profundidad de las entidades en relación con la superficie. Los sistemas de coordenadas se pueden definir tanto en mapas como escenas. (ESRI, 2020).

Sistema de Información Geográfico (SIG): Conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente con el fin de capturar, almacenar, manipular, actualizar, analizar, transformar, integrar y presentar toda la información geográfica y sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos (IGAC, 2016).

Sustancia química peligrosa: designa toda sustancia o mezcla que, en razón de propiedades químicas, físicas o toxicológicas, ya sea sola o en combinación con otras, entrañe un peligro (Decreto 1347 de 2021).

Tablas: Corresponde a información organizada en filas y sus respectivos datos asociados en campos o columnas. Estas tablas por lo general para el tema de estudio complementan la información asociada a los vectores de la Geodatabase, y se relacionan mediante un único identificador a tales elementos (ESRI, 2020).

Tratamiento de riesgos: proceso por el cual se busca modificar las consecuencias negativas del riesgo. El tratamiento del riesgo involucra la selección de una o más opciones para modificar los riesgos y la implementación de tales opciones. Una vez implementado, el tratamiento suministra controles o los modifica (ISO, 2011).

Valoración de riesgos: proceso global de identificación del riesgo, análisis del riesgo y evaluación del riesgo (ISO, 2011).

Variabilidad del clima: La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a

variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa) (IPCC, 2013).

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Ley 1523 de 2012).

Zonificación: es la representación cartográfica de áreas con características homogéneas. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo (Decreto 1807 de 2014).

12. REFERENCIAS

- Akbas, S., Blahut, J., & Sterlacchini, S. (2009). Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. *Landslide processes: from geomorphological mapping to dynamic modelling*, (January), 229-233. Recuperado a partir de http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Landslide_Processes_Conference/Akbas_et_al.pdf
- AMVA - UNIANDES. (2017). Revisión y mejoramiento del Mapa de Riesgo Químico y por transporte de sustancias peligrosas del Valle de Aburrá (MRQ). Medellín.
- AMVA. (2019, Noviembre 6). Experiencia del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Bogotá, Colombia.
- Ancione, G., & Milazzo, M. F. (2021). The Management of Na-Tech Risk Using Bayesian Network. *Water*, 13(1966). doi:10.3390/w13141966
- Antonioni, G., Landucci, G., Necci, A., Gheorghiu, D., & Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of risk due to Natech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 334-345.
- Azmeri, A., & Isa, A. H. (2018). An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1), 1-6. doi:10.4102/jamba.v10i1.550
- Bahr, N. J. (2015). *System Safety Engineering and Risk Assessment* (éd. Segunda). Estados Unidos: CRC Press.
- Bell, S.E. 1978. Successful design for mining subsidence. Large movements and structures. New York: Acad. Press 562-578.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194-205. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.022
- Borner, P. (1999). Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern.
- Calvo, B., & Savi, F. (2009). A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment. *Computers and Geosciences*, 35(5), 967-977. doi:10.1016/j.cageo.2008.04.002
- Carl Roth. (2020). Ficha de datos de seguridad: Hidróxido de sodio. Retrieved 02, 2022 from <https://www.carlroth.com/medias/SDB-6771-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyNzk0OTd8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oN2MvaDA3LzgzOTAzOTE>

2MzE5MDIucGRmfGM5MDkwNWZiY2YxYTg5ZTM4OTBmZDNmYzBIMjM0NmI0ZWl
 2ZDE4MzAwM2EyNGVmMDQxZWVhMzNTQzNWE1NmU

Carl Roth. (2021). Ficha de datos de seguridad: ácido sulfúrico. Retrieved Feb 2, 2022 from <https://www.carlroth.com/medias/SDB-HN52-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMjA1MzR8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMWlvaGFilLzkwNDAwMDU0OTY4NjIucGRmfDhhMWRIZjFhMzAyNDBjNDRiMwVIMTZiYjJiMTBkYTdkYTM1YjAzMDQyYTM5NmExMGJkODIhOTJiZDVhNmY5MDc>

Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vilchez, J. A. (1999). Análisis de riesgo en instalaciones industriales. Barcelona: UPC.

China Coal Industry Bureau (2000) Pillar Establishing and Mining Standards for Building, Water Body, Railway and Main Tunnel. Beijing: China Coal Industry Publishing House. (In Chinese)

Chen, L. X., Yin, K. L., & Dai, Y. X. (2011). Building vulnerability evaluation in landslide deformation phase. *Journal of mountain science*, 8(2), 286-295.

Cruz, A., & Suarez-Paba, M. (2019). Advances in Natech Research: An Overview. *Progress in Disaster Science*, 1(100013), 1-7. doi:<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100013>

Ciurean, R. L., Hussin, H., van Westen, C. J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Glade, T. (2017). Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*, 85(2), 929-957. doi:10.1007/s11069-016-2612-6

Cozzani, V., Antonioni, G., Landucci, G., Tugnoli, A., Bonvicini, S., & Spadoni, G. (2014). Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*(28(Supplement C)), 10-22.

Chen, LX; Yin, KL;Dai, YX. (2011). Evaluación de vulnerabilidad de edificios en fase de deformación por deslizamientos. *Revista de ciencias de la montaña*, 2011, vol. 8, No 2, pág.286-295.

Cozzani V, Campedel M, Renzi E, Krausmann E (2010). Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. Elsevier. 175: 501-509.

Cui, P., Zou, Q., Xiang, L. zhi, & Zeng, C. (2013). Risk assessment of simultaneous debris flows in mountain townships. *Progress in Physical Geography*, 37(4), 516-542. doi:10.1177/0309133313491445

Decreto 1347 de 2021 - PPAM, (2021). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=173043>

- De Groeve T, Poljansek K, Ehrlich D (2013). Recording disaster losses: Recommendations for a European approach. EUR 26111. Publications Office of the European Union.
- De Moura J y De Souza W (2016). Recognising Natech events in Brazil: Moving forward. *Natural Hazards* 82: 493-506.
- Ding, M., Heiser, M., Hübl, J., & Fuchs, S. (2016). Regional vulnerability assessment for debris flows in China—a CWS approach. *Landslides*, 13(3), 537-550. doi:10.1007/s10346-015-0578-1
- Ding, M., & Huang, T. (2019). Vulnerability assessment of population in mountain settlements exposed to debris flow: a case study on Qipan gully, Wenchuan County, China. *Natural Hazards*, 99(1), 553-569. doi:10.1007/s11069-019-03759-1
- Ding, M., Tellez, R. D., & Hu, K. (2010). Mapping vulnerability to debris flows based on SOM method. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2010, 1, 393-398. doi:10.1109/ICCAE.2010.5451928
- Dowling, C. A., & Santi, P. M. (2014). Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Natural Hazards*, 71(1), 203-227. doi:10.1007/s11069-013-0907-4
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2013). Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. París.
- Du, J., Yin, K., Nadim, F., & Lacasse, S. (2013, September). Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. In *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Paris (pp. 2181-2184).
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2014). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of San Salvador. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1251-1264
- EMDAT. (2019). *EM-DAT: The Emergency Events Database*. (D. G.-S. CRED, Éditeur, & U. C. (UCL), Producteur) Récupéré sur https://www.emdat.be/emdat_db/
- European Union. (2012). Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. *Journal of the European Union*.
- Eidsvig, U. M. K., Papathoma-Köhle, M., Du, J., Glade, T., & Vangelsten, B. V. (2014). Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. *Engineering Geology*, 181(August 1987), 15-26. doi:10.1016/j.enggeo.2014.08.006
- European Union. (2012). Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. *Journal of the European Union*.

- FEMA, 2017. HAZUS 4.0 software. <https://www.fema.gov/hazus-modernization> (last accessed 15 July 2017).
- Foudi, S., Osés-Eraso, N., & Tamayo, I. (2015). Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy*, 42, 278-292. doi:10.1016/j.landusepol.2014.08.002
- Fell, R., & Hartford, D. (1997). Landslide risk management. *Landslide risk assessment*, 51, 109.
- Fuchs, S., Heiss, K., & Hübl, J. (2007). Natural Hazards and Earth System Sciences Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Hazards Earth Syst. Sci*, 7(1), 495-506. Recuperado a partir de www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/7/495/2007/
- Gao, Y., Cao, G., Ni, P., Tang, Y., Liu, Y., Bi, J., & Ma, Z. (2021). Natural hazard triggered technological risks in the Yangtze River Economic Belt, China. *Scientific Reports*, 11(13842). doi:10.1038/s41598-021-93353-y
- Girgin, S., & Krausmann, E. (2014). *Analysis of pipeline accidents induced by natural hazards: Final report*. Ispra, Italy: European Commission, Joint Research Centre.
- Gómez-Rosales, S., Ortiz, A. M. Á., Ortiz, C., & Carmona, O. O. (2011). Análisis de la amenaza de caída de rocas a partir del estudio de huellas de impacto sobre carreteras. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 78(169), 230-238.
- Hutchinson, J. N. 1988. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides (C. Bonnard, ed.)*, 1: 3-35. Balkema: Rotterdam
- Haugen, E. D., & Kaynia, A. M. (2008). Vulnerability of structures impacted by debris flow. *Landslides and engineered slopes*. Taylor & Francis, London, 381-387.
- Hoyos Calvete, M. C. (2017). Estrategia nacional para la implementación del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos – SGA - en Colombia (2016-2020). (978-958-8901-59-6). Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Retrieved from <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/2.-Estrategia-nacional-SGA-2017.pdf>
- Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., ... Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199. doi:10.1016/j.earscirev.2019.102981
- Hutter, K., Svendsen, B., & Rickenmann, D. (1994). Debris flow modeling: A review. *Continuum Mechanics and Thermodynamics: Analysis of Complex Materials and Judicious Evaluation of the Environment*, 8(1), 1-35. doi:10.1007/BF01175749
- INSST. (Junio de 2019). *NTP 237: Reacciones químicas peligrosas con el agua*. Obtenido de Instituto: https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_237.pdf/99d93f75-e39f-407c-9c8b-6732499637b7

- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296. doi:10.1029/97RG00426
- Jakob, M., Stein, D., & Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, 60(2), 241-261. doi:10.1007/s11069-011-0007-2
- Jakob, Matthias, & Hungr, O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. On Springer Praxis Books. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/b138657
- Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58(3), 271-289.
- Kaźmierczak, A., & Cavan, G. (2011). Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 185-197. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.07.008
- Kang, H. sub, & Kim, Y. tae. (2016). The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Natural Hazards*, 80(3), 1475-1493. doi:10.1007/s11069-015-2032-z
- Kean, J. W., Staley, D. M., Lancaster, J. T., Rengers, F. K., Swanson, B. J., Coe, J. A., ... Lindsay, D. N. (2019). Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California, USA: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment. *Geosphere*, 15(4), 1140-1163. doi:10.1130/GES02048.1
- Keiler, M., & Fuchs, S. (2016). Vulnerability and exposure to geomorphic hazards: some insights from the European Alps. *En Geomorphology and society* (pp. 165-180). Springer.
- Keiler, M., Knight, J., & Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2461-2479. doi:10.1098/rsta.2010.0047
- Khakzad, N., & Van Gelder, P. (2018). Vulnerability of industrial plants to flood induced Natechs: A Bayesian network approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 169, 403-411. doi:10.1016/j.ress.2017.09.016
- Khoirunissa Ariyanta , D., Khairunisa Jaelani, M., Suarez-Paba, M., & Cruz, A. (2019). Natech: The silent and potentially deadly threat in ASEAN. *Dans ASEAN Risk Monitor and Disaster Management Review (ARMOR)* (pp. 96-110). ASEAN Coordinating Centre for Humanitarian Assistance on Disaster Management (AHA Centre).
- Kiyohara, K. (2016). *Incidence of Accidents Involving High Pressure Gases in Japan: Causes, Trends, and Recommended Countermeasures*. Kyoto, Japón: Kyoto University.
- Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E. (2017). *Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations*. Elsevier.

- Krausmann, E., Renni, E., Campedel, M., & Cozzani, V. (2011). (2011). Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards*, 59(1), 285-300. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9754-3>
- Kvočka, D., Falconer, R. A., & Bray, M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. *Natural Hazards*, 84, 1569–1599. doi:10.1007/s11069-016-2501-z
- Khoirunissa Ariyanta , D., Khairunisa Jaelani, M., Suarez-Paba, M., & Cruz, A. (2019). Natech: The silent and potentially deadly threat in ASEAN. En *ASEAN Risk Monitor and Disaster Management Review (ARMOR)* (págs. 96-110). ASEAN Coordinating Centre for Humanitarian Assistance on Disaster Management (AHA Centre).
- Kim, M. Il, & Kwak, J. H. (2020). Assessment of building vulnerability with varying distances from outlet considering impact force of debris flow and building resistance. *Water (Switzerland)*, 12(7). doi:10.3390/w12072021
- Kiremidjian A, Ortiz K, Nielsen R, Safavi B (1985). Seismic risk to major industrial facilities. Report 72. Department of Civil and Environmental Engineering. Stanford University.
- Kiyohara, K. (2016). Incidence of Accidents Involving High Pressure Gases in Japan: Causes, Trends, and Recommended Countermeasures. Kyoto, Japón: Kyoto University.
- Klein, J. A., Tucker, C. M., Steger, C. E., Nolin, A., Reid, R., Hopping, K. A., Molden, D. (2019). An integrated community and ecosystem-based approach to disaster risk reduction in mountain systems. *Environmental science & policy*, 94, 143-152.
- Krausmann E, Renni E, Campedel M, Cozzani V (2011). Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards* 59 (1): 285-300.
- Krausmann E, Cruz AM, Salzano E, (2017). Natech risk assessment and management: Reducing the risk of natural-hazard impact on hazardous installations. Elsevier.
- Krausmann E, Girgin S, Necci A, (2019). Natural hazard impacts on industry and critical infrastructure: Natech risk drivers and risk management performance indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 40: 101163.
- Kvočka, D., Falconer, R. A., & Bray, M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. *Natural Hazards*, 84, 1569–1599. doi:10.1007/s11069-016-2501-z
- Landucci, G., Antonioni, G., Necci, A., & Cozzani, V. (2016). Quantitative Risk Assessment of Cascading Events Triggered by Floods. *Chemical Engineering Transactions*, 48. doi:DOI: 10.3303/CET1648151
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2012). Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*, 106, 200-216. doi:10.1016/j.ress.2012.05.010

- Landucci, G., Necci, A., Tugnoli, A., Antonioni, G., & Cozzani, V. (2014). NaTech Scenarios Caused by Flooding: Evaluation of Accident Frequency by the Use of Fragility Models. *Chemical Engineering Transactions*, 36. doi:DOI: 10.3303/CET1436072
- Ley 1523. (24 de Abril de 2012). *Diario Oficial*. Colombia: Congreso de Colombia.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125-134.
- Liang, Y., & Xiong, F. (2019). Quantification of debris flow vulnerability of typical bridge substructure based on impact force simulation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1839-1862. doi:10.1080/19475705.2019.1641564
- Liu, X. (2006). Site-specific vulnerability assessment for debris flows: Two case studies. *Journal of Mountain Science*, 3(1), 20-27. doi:10.1007/s11629-006-0020-1
- Liu, X., & Lei, J. (2003). A method for assessing regional debris flow risk: An application in Zhaotong of Yunnan province (SW China). *Geomorphology*, 52(3-4), 181-191. doi:10.1016/S0169-555X(02)00242-8
- Liu, X., Yue, Z. Q., Tham, L. G., & Lee, C. F. (2002). Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, Southwestern China. *Environmental Management*, 30(2), 249-264. doi:10.1007/s00267-001-2658-3
- Lo, W. C., Tsao, T. C., & Hsu, C. H. (2012). Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study. *Natural Hazards*, 64(3), 2107-2128. doi:10.1007/s11069-012-0124-6
- Luna, B. Q., Blahut, J., Kappes, M., Akbas, S. O., Malet, J.-P., Remaître, A., Jaboyedoff, M. (2014). Methods for Debris Flow Hazard and Risk Assessment. En *Advances in Natural and Technological Hazards Research* (Vol. 34, pp. 133-177). doi:10.1007/978-94-007-6769-0_5
- Luo, H., Zhang, L., Wang, H., & He, J. (2020). Multi-hazard vulnerability of buildings to debris flows. *Engineering Geology*, 279. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105859
- Luo, X., Cruz, A., & Tzioutzios, D. (2020). Extracting Natech Reports from Large Databases: Development of a Semi-Intelligent Natech Identification Framework . *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(6), 735-750.
- Luo, X., Cruz, A. M., & Tzioutzios, D. (2021). Climate change and temporal-spatial variation of tropical storm-related Natechs in the United States from 1990 to 2017- Is there a link? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 102366.
- Mavrouli, O., & Corominas, J. (2010). Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(10), 2055-2066.
- Mileti, D. (1999). *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Joseph Henry Press. doi:https://doi.org/10.17226/5782

- MunichRe. (2019). *The natural disasters of 2018 in figures*. Récupéré sur <https://www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/the-natural-disasters-of-2018-in-figures.html>
- NITE. (2006a). Chemical Management Field-GHS Information: Sodium dithionite. Retrieved 02, 2022 from <https://www.nite.go.jp/chem/english/ghs/06-imcg-1377e.html>
- NITE. (2006b). Chemical Management Field-GHS Information: Sulfuric Acid. Retrieved 02, 2022 from <https://www.nite.go.jp/chem/english/ghs/06-imcg-0618e.html>
- NITE. (2009). Chemical Management Field-GHS Information: Sodium Hydroxide. Retrieved 02, 2022 from <https://www.nite.go.jp/chem/english/ghs/09-mhlw-2010e.html>
- OECD. (2003). *Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response*. Récupéré sur <http://www.oecd.org/chemicalsafety/chemical-accidents/guiding-principles-chemical-accident-prevention-preparedness-and-response.htm>
- OECD. (2015). Addendum Number 2 to the OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response to Address Natural Hazards Triggering Technological Accidents (NaTechs). 2nd.
- OECD. (2022). Chemical Substance Search. Retrieved 02, 2022 from <https://www.echemportal.org/echemportal/substance-search>
- Olarte, J. M. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Libros del Servicio Geológico Colombiano
- Ouyang, C., Wang, Z., An, H., Liu, X., & Wang, D. (2019). An example of a hazard and risk assessment for debris flows—A case study of Niwan Gully, Wudu, China. *Engineering Geology*, 263, 105351. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105351
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., & Glade, T. (2012). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: Debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64(3), 2083-2105. doi:10.1007/s11069-012-0105-9
- Papathoma-Köhle, M., Zischg, A., Fuchs, S., Glade, T., & Keiler, M. (2015). Loss estimation for landslides in mountain areas - An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. *Environmental Modelling and Software*, 63, 156-169. doi:10.1016/j.envsoft.2014.10.003
- Park, H., Cox, D.T., 2016. Probabilistic assessment of near-field tsunami hazards: inundation depth, velocity, momentum flux, arrival time and duration applied to seaside, Oregon. *Coast. Eng.* 117, 79–86.
- Peng, S.S. 1992. Surface subsidence engineering. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration 77-90.
- Prieto, J. A., Journeay, M., Acevedo, A. B., Arbelaez, J. D., & Ulmi, M. (2018). Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Engineering Geology*, 239(March), 144-157. doi:10.1016/j.enggeo.2018.03.014

- Quan Luna, B., Blahut, J., Camera, C., van Westen, C., Apuani, T., Jetten, V., & Sterlacchini, S. (2013). Physically based dynamic run-out modelling for quantitative debris flow risk assessment: a case study in Tresenda, northern Italy. *Environmental Earth Sciences*, 72(3), 645-661. doi:10.1007/s12665-013-2986-7
- Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C. J., Sterlacchini, S., van Asch, T. W. J., & Akbas, S. O. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7), 2047-2060. doi:10.5194/nhess-11-2047-2011
- Química PIMA. (2016a). Hoja de datos de seguridad: Ácido nítrico. Retrieved Feb 2, 2022 from [http://www.quimicapima.com/agricultura/Acido_nitrico_55_\(HDS-SGA\).pdf](http://www.quimicapima.com/agricultura/Acido_nitrico_55_(HDS-SGA).pdf)
- Química PIMA. (2016b). Hoja de datos de seguridad: Ácido Sulfúrico. Retrieved Feb 2, 2022 from [http://www.quimicapima.com/agricultura/Acido_sulfurico_98_\(HDS-SGA\).pdf](http://www.quimicapima.com/agricultura/Acido_sulfurico_98_(HDS-SGA).pdf)
- Ragozin, A. L., & Tikhvinsky, I. O. (2000). Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. *Landslides in research, theory and practice*, 1257-1262.
- Ramírez Gil, J. (2019, Jun 12). Movimiento en masa pone en riesgo poliducto y gasoducto en Copacabana. *Récupéré sur RCN Radio*: <https://www.rcnradio.com/colombia/antioquia/movimiento-en-masa-pone-en-riesgo-poliducto-y-gasoducto-en-copacabana>
- Rheinberger, C. M., Romang, H. E., & Bründl, M. (2013). Proportional loss functions for debris flow events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8), 2147-2156. doi:10.5194/nhess-13-2147-2013
- Ricci, F., Casson Moreno, V., & Cozzani, V. (2021). A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 703-713. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.031>
- Ricci F, Casson Moreno V, Cozzani V (2020). A comprehensive analysis of the occurrence of Natech events in the process industry. Elsevier. 147: 703-713.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Sengul, H., Santella, N., Steinberg, L., & Cruz, A. (2012). Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. *Disasters*, 36, 723-743. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2012.01272.x>
- Servicio Geológico Colombiano - SGC, et al. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC, 2016.
- Showalter, P. S., & Myers, M. F. (1994). Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations. *Risk Analysis*, 14(2), 169-182.

- Skempton, A. W., and Hutchinson, J. N. 1969. Stability of natural slopes and embankment foundations. State of the Art Report. 7th Int. Conf. Soil mechanics and Foundation Eng. Mexico State of the Art vol. p.291-340.
- Suarez-Paba, M., & Cruz, A. (2022). A paradigm shift in Natech risk management: Development of a rating system framework for evaluating the performance of industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74, 104615.
- Suarez-Paba, M., Perreux, M., Munoz, F., & Cruz, A. M. (2019). Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades. *Safety Science*, 116, 58-77. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.03>
- Thouret, J. C., Antoine, S., Magill, C., & Ollier, C. (2020). Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Reviews*, 201, 103003. doi:10.1016/j.earscirev.2019.103003
- Totschnig, R., & Fuchs, S. (2013). Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology*, 155, 31-44. doi:10.1016/j.enggeo.2012.12.019
- Totschnig, R., Sedlacek, W., & Fuchs, S. (2011). A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards*, 58(2), 681-703. doi:10.1007/s11069-010-9623-5
- Tsao, T., Hsu, W., Cheng, C., Lo, W., & Chen, C. (2010). A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan. *International symposium interpraevent in the Pacific Rim—Taipei*, (January 2010), 930-939.
- U.S. Department of Transportation. (2016). Guía de respuesta en caso de emergencia. Récupéré sur <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/241-GUADERESPUESTAENCASODEEMERGENCIA2016.PDF>
- UNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. Récupéré sur Repositorio Gestión del Riesgo de Desastres: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf?sequence=2>
- UNGRD. (2018). Lo que usted debe saber sobre riesgo tecnológico. Bogotá. Récupéré sur <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27100>
- UNISDR. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Récupéré sur <https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework>
- United Nations. (2013). Globally Harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). New York and Geneva.
- Villalba, N. (2017). Marco de referencia para el análisis del riesgo asociado a eventos Natech provocados por inundaciones. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Wallemacq, P., & House, R. (2018). Economic Losses, Poverty & Disasters 1998-2017. Récupéré sur <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/61119>

- Winter, M. G., Smith, J. T., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., & Argyroudis, S. (2014). An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 291-305. doi:10.1007/s10064-014-0570-3
- Yan, S., He, S., Deng, Y., Liu, W., Wang, D., & Shen, F. (2020). A reliability-based approach for the impact vulnerability assessment of bridge piers subjected to debris flows. *Engineering Geology*, 269(February), 105567. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105567
- Yang, Y., Chen, G., & Reniers, G. (2020). Vulnerability assessment of atmospheric storage tanks to floods based on logistic regression. *Reliability Engineering and System Safety*, 196. doi:10.1016/j.ress.2019.106721
- Zheng, K.Z., Guo, G.L., Tan, Z.X. 2001. Analysis of Movement and Deformation Characteristics of Buildings Above Mining Subsidence Areas. *Journal of China University of Mining & Technology* 30(4):354-358.
- Zhang, J., Guo, Z. X., Wang, D., & Qian, H. (2016). The quantitative estimation of the vulnerability of brick and concrete wall impacted by an experimental boulder. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), 299-309. doi:10.5194/nhess-16-299-2016
- Zhang, S., Zhang, L., Li, X., & Xu, Q. (2018). Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows. *Engineering Geology*, 247, 145-158. doi:10.1016/j.enggeo.2018.10.017
- Zimmermann, M., & Keiler, M. (2015). International frameworks for disaster risk reduction: Useful guidance for sustainable mountain development? *Mountain Research and Development*, 35(2), 195-202.
- Zuluaga Mayorga, S., Sánchez-Silva, M., Ramírez Olivar, O. J., & Muñoz Giraldo, F. (2019). Development of parametric fragility curves for storage tanks: A Natech Approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 1-10. doi:10.1016/j.ress.2019.04.008

ANEXO 1. LISTA SUSTANCIAS MRQ-2017

ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua	ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua
1	Nitrato de amonio (abonos susceptibles de autodescomposición)	—	No	45	3-(2-etilhexiloxi) propilamina	5397-31-9	No
2	Nitrato de amonio (calidad para abonos)	—	No	46	Mezclas (*) de hipoclorito de sodio clasificadas como peligrosas para el ambiente acuático en la categoría 1 de peligro agudo[H400] que contengan menos de un 5 % de cloro activo y no estén clasificadas en ninguna otra categoría de peligro en la Tabla (Sustancias peligrosa por peligrosidad – SGA).	—	N.A.
3	Nitrato de amonio (calidad técnica)	—	No	47	Propilamina	107-10-8	No
4	Nitrato de amonio (materiales «fuera de especificación» y abonos que no superen la prueba de detonabilidad)	—	No	48	Acrilato de terc-butilo	1663-39-4	No
5	Nitrato de potasio (5000/10000)	7757-79-1	No	49	2-metil-3-butenonitrilo	16529-56-9	No
6	Nitrato de potasio (1250/5000)	—	No	50	Tetrahidro-3,5-dimetil-1,3,5-tiadiazina-2-tiona (dazomet)	533-74-4	No
7	Pentaóxido de diarsénico, ácido arsénico (V) y/o sales	1303-28-2	No	51	Acrilato de metilo	96-33-3	No
8	Trióxido de arsénico, ácido arsenioso (III) y/o sales	1327-53-3	No	52	3-metilpiridina	108-99-6	No
9	Bromo	7726-95-6	No	53	1-bromo-3-cloropropano	109-70-6	No

ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua	ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua
10	Cloro	7782-50-5	No	54	Clorato de Sodio	7775-09-9	No
11	Compuestos de níquel en forma pulverulenta inhalable: monóxido de níquel, dióxido de níquel, sulfuro de níquel, disulfuro de triníquel, trióxido de diníquel	—	N.A.	55	Cianuro de Hidrógeno	74-90-8	No
12	Etilenimina	151-56-4	Sí	56	Fluoruro de Hidrógeno	7664-39-3	Sí
13	Flúor	7782-41-4	Sí	57	Dióxido de azufre	7446-09-5	Sí
14	Formaldehído (concentración 90 %)	50-00-0	No	58	Acrilonitrilo	107-13-1	No
15	Hidrógeno	1333-74-0	No	59	Disulfoton	298-04-4	No
16	Ácido clorhídrico (gas licuado)	7647-01-0	No	60	Paration	56-38-2	No
17	Derivados de alquiplomo	—	N.A	61	Aldicarb	116-06-3	No
18	Gases inflamables licuados de las categorías 1 o 2 (incluido el GLP) y gas natural (véase la nota 7)	—	No (datos GLP)	62	Warfarina	81-81-2	No
19	Acetileno	74-86-2	Sí	63	Cloruro de vinilo monómero	75-01-4	Sí (no es compatible)
20	Óxido de etileno	75-21-8	No	64	Metil bromuro (Bromuro de metilo / CH ₃ Br)	74-83-9	No
21	Óxido de propileno	75-56-9	No	65	Tetraetilo de plomo (Plomo tetraetilo/ Pb(C ₂ H ₅) ₄)	78-00-2	Sí
22	Metanol	67-56-1	No	66	Acetona	67-64-1	No
23	4,4-metilen-bis (2-cloroanilina) y/o sus sales en forma pulverulenta	101-14-4	No	67	Ácido clorhídrico	7647-01-0	Si
24	Isocianato de metilo	624-83-9	Si	68	Ácido nítrico	7697-37-2	No
25	Oxígeno	7782-44-7	No	69	Ácido sulfúrico	7664-93-9	Si
26	2,4-diisocianato de tolueno	584-84-9	Si	70	Anhídrido maleico	108-31-6	No
27	2,6-diisocianato de tolueno	91-08-7	Si	71	Benceno	71-43-2	No
28	Dicloruro de carbonilo (fosgeno)	75-44-5	Si	72	4-cloroanilina	106-47-8	No
29	Arsina (trihidruro de arsénico)	7784-42-1	No	73	Clorobenceno	108-90-7	No

ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua	ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua
30	Fosfina (trihidruro de fósforo)	7803-51-2	No	74	Dicromato de sodio	10588-01-9	No
31	Dicloruro de azufre	10545-99-0	Si	75	Disulfuro de carbono	75-15-0	No
32	Trióxido de azufre	7446-11-9	Si	76	Etilendiamina	107-15-3	No
33	Policlorodibenzofuranos y policlorodibenzo-dioxinas (incluida la TCDD) calculadas en equivalente de TCDD (véasela nota 8)	—	No (TCDD)	77	Fenol	108-95-2	No
34	Los siguientes CARCINÓGENOS o las mezclas que los contengan en concentraciones superiores al 5 % en peso: 4-aminodifenilo y/o sus sales, triclorobenceno, bencidina y/o sus sales, éter bis (clorometílico), éter clorometílico y metílico, 1,2-dibromoetano, sulfato de dietilo, sulfato de dimetilo, cloruro de dimetil- carbamoilo, 1,2-dibromo-3-cloropropano, 1,2-dimetilhidracina, dimetilnitrosamina, triamida hexametilfosfórica, hidracina, 2-naftilamina y/o sus sales, 4-nitrodifenil o 1,3 propanosulfona	—		78	Formaldehido	50-00-0	No
35	Gasolinas y naftas	—	No	79	Hidrosulfito de sodio	7775-14-6	Si
36	Querosenos (incluidos carburorreacores)	—	No (Queroseno)	80	Hidróxido de sodio	1310-73-2	Si
37	Gasóleos	—	No	81	Monóxido de plomo	1317-36-8	No
38	Fuelóleos pesados	—	No	82	Permanganato de potasio	7722-64-7	No
39	Sustancias alternativas a los productos mencionados en las letras a) a d) con propiedades	—		83	Tetracloroetileno	127-18-4	No

ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua	ID	Nombre	No. CAS	Reacciona con agua
	similares en lo relativo a inflamabilidad y peligros medioambientales						
40	Amoníaco anhidro	7664-41-7	No	84	Toluendiisocianato	584-84-9	Si
41	Trifluoruro de boro	7637-07-2	Si	85	Tolueno	108-88-3	No
42	Sulfuro de hidrógeno	7783-06-4	No	86	Peróxido de hidrógeno	7722-84-1	No
43	Piperidina	110-89-4	No	87	Gases inflamables categoría SGA 1 y 2 (NO LICUADOS)	—	NA
44	Bis(2-dimetilaminoetil) (metil)amina	3030-47-5	No	88	Líquidos inflamables categoría SGA 1, SGA 2 o 3 almacenados por encima del punto de ebullición	—	

(*) Siempre que la mezcla, en ausencia de hipoclorito de sodio, no esté clasificada como peligrosa para el ambiente acuático en la categoría 1 de peligro agudo [H400].

NOTA: La información de reactividad con el agua es indicativa y ha sido extraída de diferentes hojas de seguridad, pero debe ser validada y verificada por las instalaciones industriales que manipulan, almacenan o producen dichas sustancias.

ANEXO 2. UMBRALES MÁXIMOS PARA ALGUNAS SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS DEL MRQ QUE NO CONTENÍAN DICHA INFORMACIÓN

Sustancia	Peligros físicos	Peligros para la salud	Peligros para el ambiente acuático	Categoría	Umbral máximo (ton)	Referencia
Ácido nítrico	Sustancias y mezclas corrosivas para los metales			Categoría 1	200	(Química PIMA, 2016a)
	Líquido comburente			Categoría 3		
		Corrosión/Irritación cutánea		Categoría 1A		
		Lesiones oculares graves		Categoría 1		
Ácido sulfúrico	Sustancia corrosiva para los metales			Categoría 1	200	(Carl Roth, 2021; NITE, 2006b; Química PIMA, 2016b)
		Toxicidad específica en determinados órganos (exposición única)		Categoría 1		
		Toxicidad aguda por ingestión		Categoría 4/2		
		Corrosión/irritación cutánea		Categoría 1A/1C		
		Lesiones oculares graves/irritación ocular		Categoría 1		
Ácido clorhídrico					250	(MinTrabajo, 2021)
Hidróxido de sodio	Corrosivo para los metales			Categoría 1	200	(Carl Roth, 2020; NITE, 2009)
		Corrosión/irritación cutánea		Categoría 1A		
		Lesiones oculares graves/irritación ocular		Categoría 1		
		Toxicidad específica en determinados órganos (exposición única)		Categoría 1		

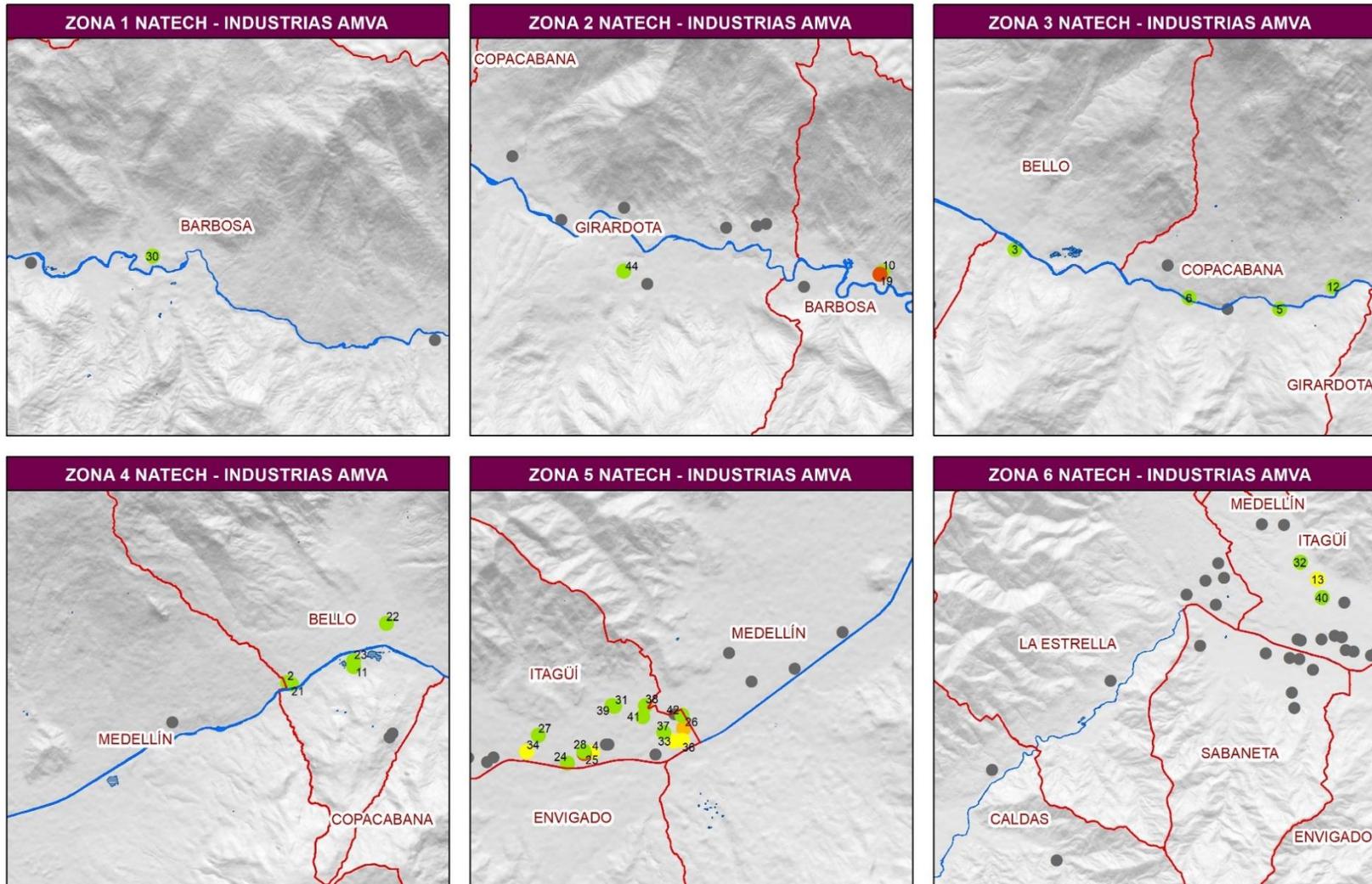
Sustancia	Peligros físicos	Peligros para la salud	Peligros para el ambiente acuático	Categoría	Umbral máximo (ton)	Referencia
Hidrosulfito de sodio	Sustancias y mezclas que experimentan calentamiento espontáneo			Categoría 1	500	(NITE, 2006a)
		Toxicidad aguda oral		Categoría 4		
		Irritación ocular		Categoría 2A-2B		
		Irritación cutánea		Categoría 2		
			Peligros para el ambiente acuático	Categoría crónica 2		

NOTA: Cabe mencionar que los criterios en negrilla son los utilizados para determinar el umbral máximo.

Para este ejercicio se consultaron las referencias presentadas en la tabla para cada caso específico y de manera general las siguientes fuentes: Fuente: (Hoyos Calvete, 2017; OECD, 2022)

ANEXO 3. MAPAS DETALLADOS DE ÍNDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL

MAPA DE INSTALACIONES CON PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR INUNDACIÓN



● Menor

● Intermedio menor

● Intermedio

● Mayor

● Industria

2 COMPAÑIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
3 OSPINA GRASAS Y PIELÉS LTDA
4 EMPRESA DE COSMÉTICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO
5 CUEROS Y DISEÑOS S.A.S.
6 DISOLVAN Y CIA. S.A.S

10 TINTURAS Y TELAS S.A.
11 DYNA Y CIA S.A.
12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.
13 CERVECERÍA UNIÓN S.A
19 PROQUIMCOL S.A.

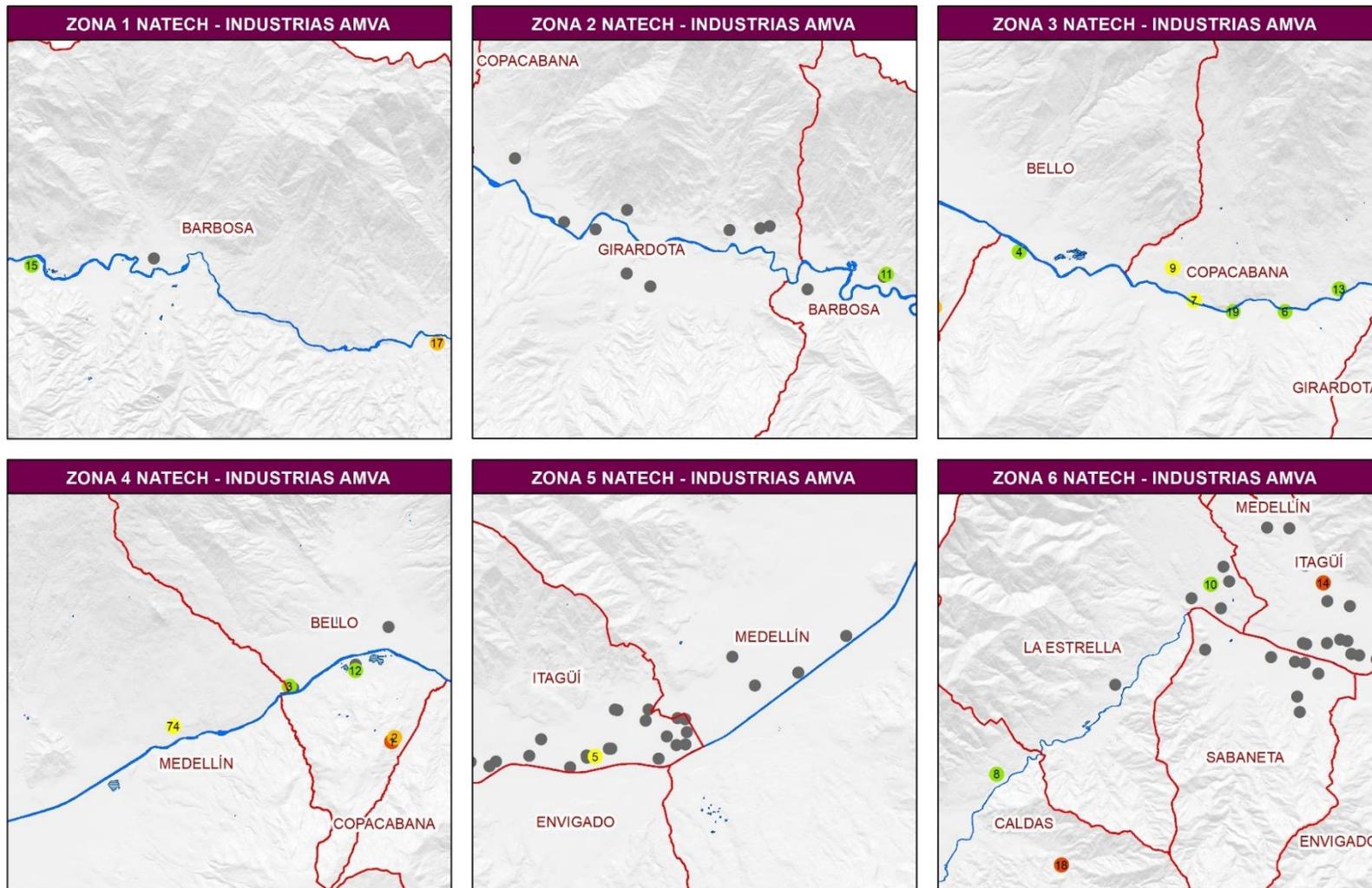
21 SOLLA S.A.
22 COMERPA DE MEDELLÍN S.A.S.
23 INCAMETAL S.A.S.
24 CENTRAL QUIMICA S.A.S.
25 COLOMBINA SA

26 FÁBRICA DE LICORES Y ALCOHOLES DE ANTIOQUIA
27 INDUSTRIAS FATELARES S.A.S
28 TINTEXA S.A
30 COLOMBIANA KIMBERLY COLPAPE S.A.
31 ARCTEX TINTORERÍA S.A.S

32 FINCA S.A.S
33 COMPAÑÍA DE EMPAQUES S.A
34 COLTEJER S.A
36 FABRICA DE ARTICULOS DE PROTECCION SAS
37 GONVARRI COLOMBIA S.A

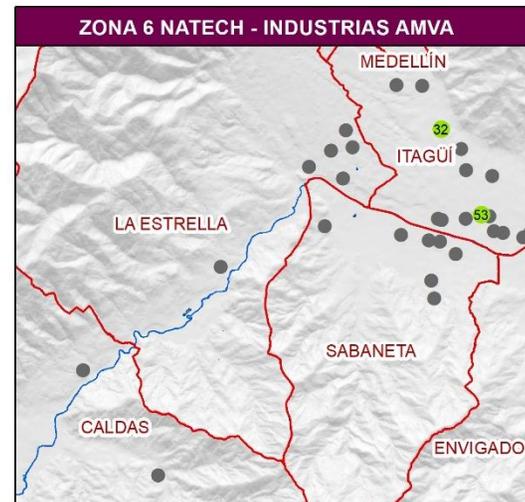
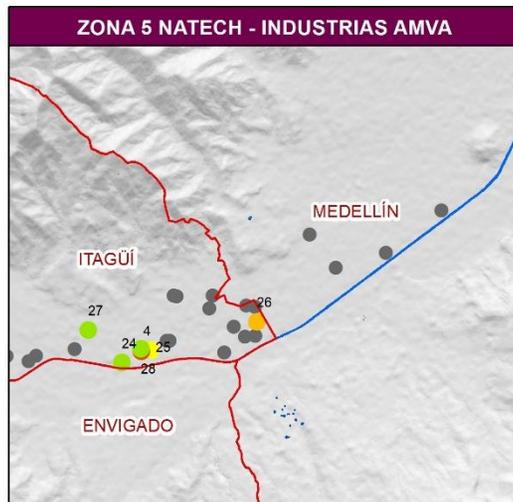
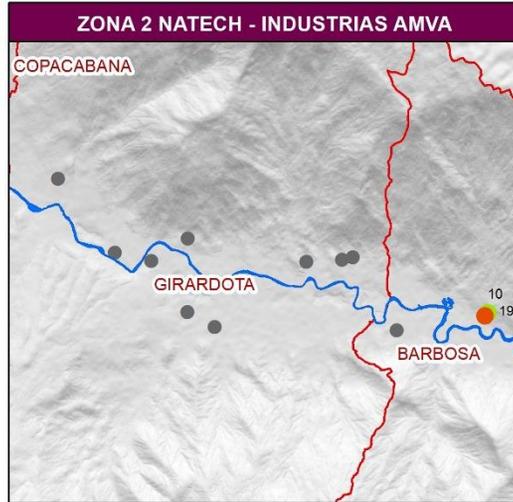
38 HERRAJES GAHER S.A.S
39 PROCESOS Y TERMINADOS DE CONFECCIONES S.A.S
40 INVERSIONES Y SERVICIOS NEAM E.U
41 PARAPLÁSTICOS S.A.S
42 TECNAS S.A
44 COLCERAMICA S.A.S

MAPA DE INSTALACIONES CON PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR MOVIMIENTO EN MASA



- | | | | | | |
|--------------------|---|---|---|--------------------------------------|---|
| ● Menor | 1 GASES DE ANTIOQUIA S.A. E.S.P. | 5 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO | 9 INDUSTRIAS HACEB S.A. | 17 BYCSA S.A. | 18 OPERADORA AVÍCOLA COLOMBIA S.A.S |
| ● Intermedio menor | 2 INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P. | 6 CUEROS Y DISEÑOS S.A.S. | 10 FÁBRICA DE HILOS Y PRODUCTOS VARIOS FAHILOS SA | 13 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S. | 19 INVATAM S.A. |
| ● Intermedio | 3 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A | 7 DISOLVAN Y CIA. S.A.S | 11 TINTURAS Y TELAS S.A. | 14 CERVECERÍA UNIÓN S.A | 74 ANHIDRIDOS Y DERIVADOS DE COLOMBIA S.A. ANDERCOL |
| ● Mayor | 4 OSPINA GRASAS Y PIELES LTDA | 8 ZUSATEX S.A.S | 12 DYNA Y CIA S.A. | 15 TABLEMAC MDF S.A.S. | |
| ● Industria | | | | | |

MAPA DE INSTALACIONES CON PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR AVENIDA TORRENCIAL



● Menor

● Intermedio menor

● Intermedio

● Mayor

● Industria

2 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
 4 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO
 10 TINTURAS Y TELAS S.A.
 11 DYNA Y CIA S.A.

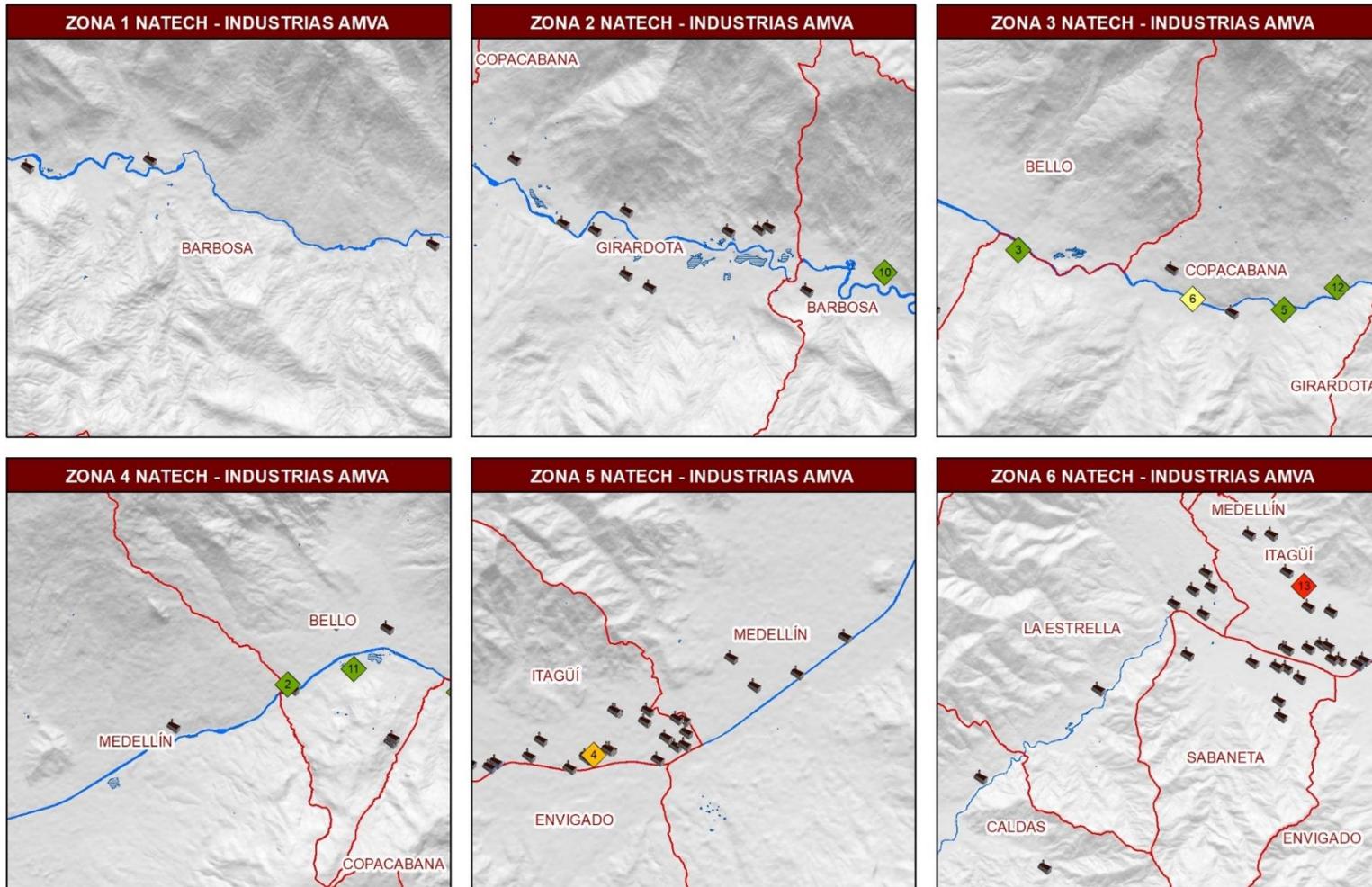
12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.
 19 PROQUIMCOL S.A.
 21 SOLLA S.A.
 22 COMERPA DE MEDELLIN S.A.S.

23 INCAMETAL S.A.S.
 24 CENTRAL QUIMICA S.A.S.
 25 COLOMBINA SA
 26 FÁBRICA DE LICORES Y ALCOHOLES DE ANTIOQUIA

27 INDUSTRIAS FATELARES S.A.S
 28 TINTEXA S.A
 30 COLOMBIANA KIMBERLY COLPAPE S.A.
 32 FINCA S.A.S
 53 AUTOTECNIA COLOMBIANA S.A.S.

ANEXO 4. MAPAS DE INSTALACIONES INDUSTRIALES CON ÍNDICE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL ASOCIADO A DIFERENTES AMENAZAS NATURALES

INDUSTRIAS CON INDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR AMENAZAS DE MOVIMIENTO EN MASA Y DE INUNDACIÓN



Movimiento en masa, Inundación

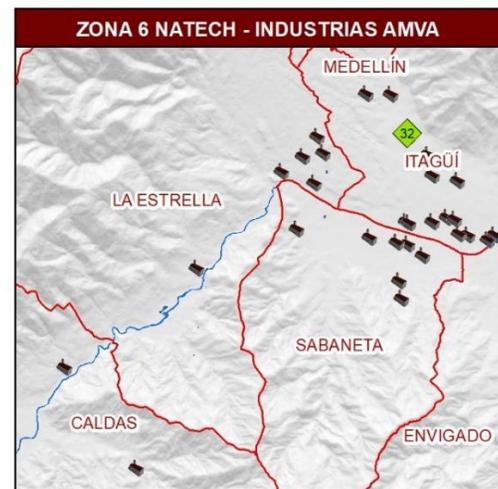
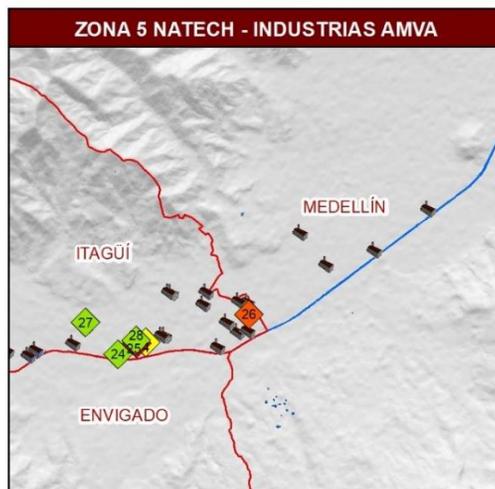
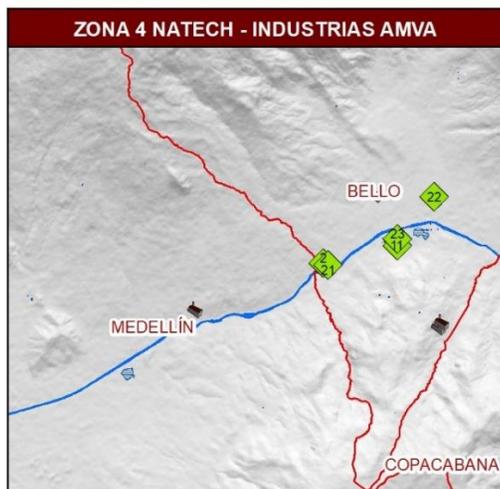
- Menor, Menor
- Intermedio menor, Menor
- Intermedio menor
- Mayor, Intermedio menor
- ◆ Industrias

- 2 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
- 3 OSPINA GRASAS Y PIELES LTDA
- 4 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO

- 5 CUEROS Y DISEÑOS S.A.S.
- 6 DISOLVAN Y CÍA. S.A.S
- 10 TINTURAS Y TELAS S.A.

- 11 DYNA Y CIA S.A.
- 12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.
- 13 CERVECERÍA UNIÓN S.A

INDUSTRIAS CON INDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR AMENAZAS DE INUNDACIÓN Y DE AVENIDA TORRENCIAL



Inundación, Avenida Torrencial

- Menor
- Intermedio menor
- Intermedio
- Mayor
- Industrias

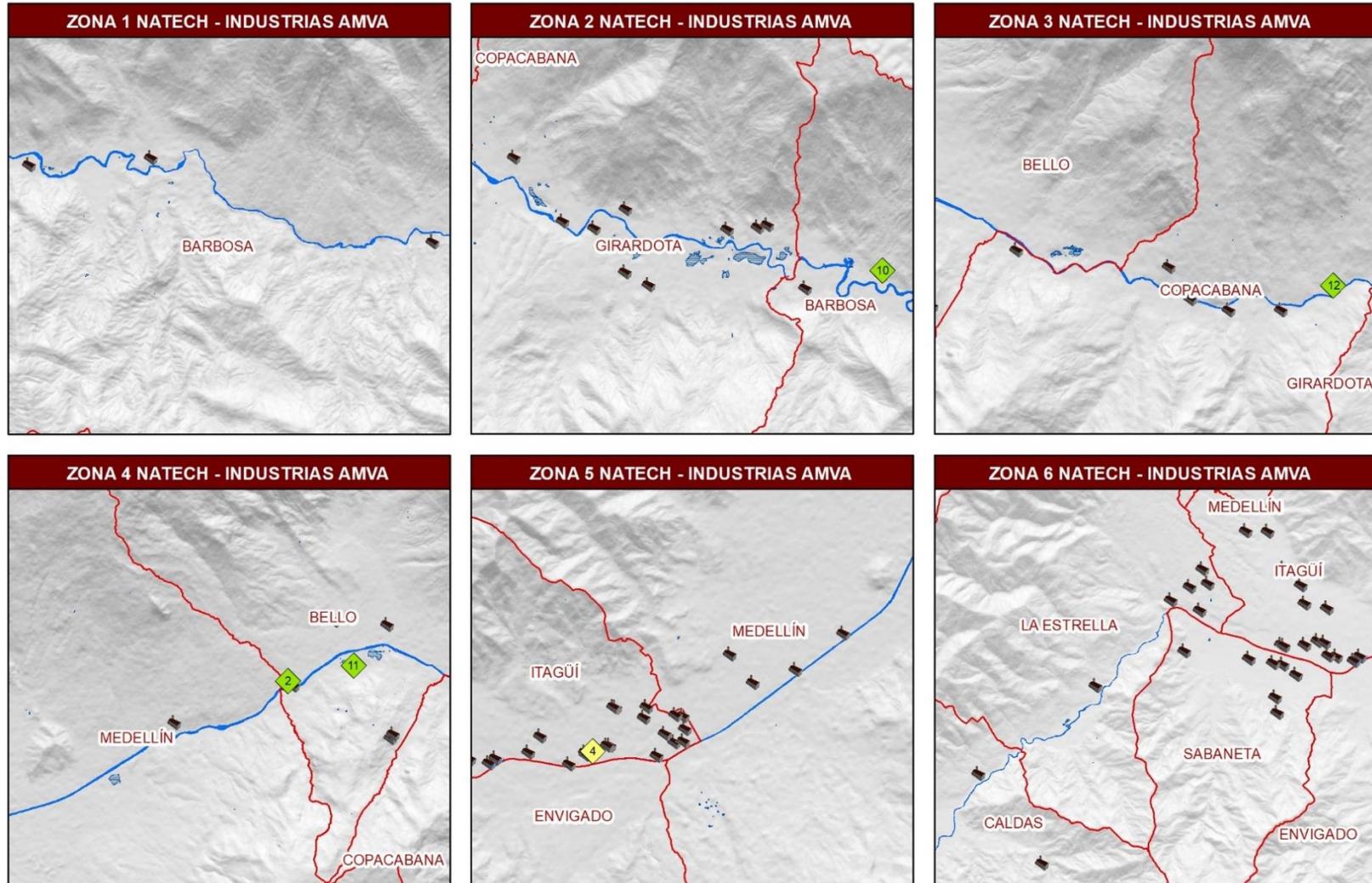
- 2 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
- 4 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO
- 10 TINTURAS Y TELAS S.A.
- 11 DYNA Y CIA S.A.

- 12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.
- 19 PROQUIMCOL S.A.
- 21 SOLLA S.A.
- 22 COMERPA DE MEDELLIN S.A.S.

- 23 INCAMETAL S.A.S.
- 24 CENTRAL QUIMICA S.A.S.
- 25 COLOMBINA SA
- 26 FÁBRICA DE LICORES Y ALCOHOLES DE ANTIOQUIA

- 27 INDUSTRIAS FATELARES S.A.S
- 28 TINTEXA S.A
- 30 COLOMBIANA KIMBERLY COLPAPE S.A.
- 32 FINCA S.A.S

INDUSTRIAS CON INDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR AMENAZAS DE AVENIDA TORRENCIAL Y DE MOVIMIENTO EN MASA



Movimiento en masa, Inundación

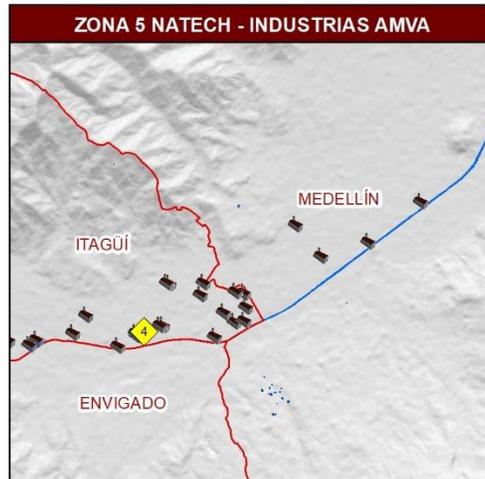
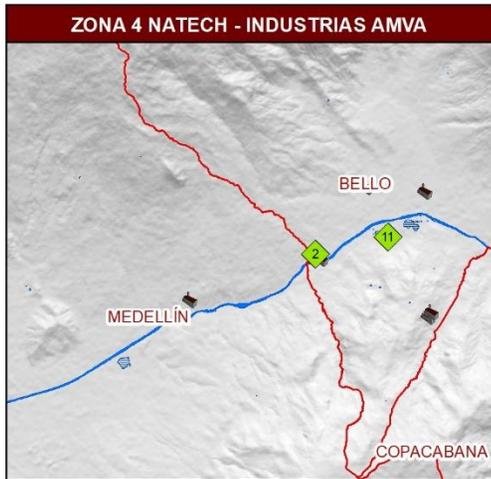
- ◆ Menor
- ◆ Intermedio menor
- ↔ Industrias

- 2 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
- 4 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO

- 10 TINTURAS Y TELAS S.A.
- 11 DYNA Y CIA S.A.

- 12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.

INDUSTRIAS CON INDICE DE PELIGROSIDAD INDUSTRIAL POR AMENAZAS:
AVENIDA TORRENCIAL, MOVIMIENTO EN MASA E INUNDACIÓN



Movimiento en masa, Av torrencial, Inundación

- Menor
- Intermedio menor
- ◆ Industrias

2 COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
4 EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO

10 TINTURAS Y TELAS S.A.
11 DYNA Y CIA S.A.

12 ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.

ANEXO 5. PELIGROSIDAD DE SUSTANCIAS QUE REACCIÓNAN CON EL AGUA

Dentro de los peligros físicos reportados por el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) se encuentra aquel producido por sustancias líquidas o sólidas que en presencia de agua desprenden gases inflamables de manera espontánea en cantidades peligrosas. En este sentido, el SGA plantea la siguiente clasificación de peligros (United Nations, 2013):

- **Categoría 1:** Toda sustancia que, a la temperatura ambiente, reacciona con gran intensidad en contacto con el agua y desprende gases que, por lo general, tienen a inflamarse espontáneamente, o que a la temperatura ambiente reacciona rápidamente en contacto con el agua de tal manera que el régimen de emanación de gas inflamable es igual o superior a 10 litros por kilogramo de sustancia en el espacio de un minuto.
- **Categoría 2:** Toda sustancia o mezcla que, a la temperatura ambiente, reacciona rápidamente en contacto con el agua de modo que el régimen máximo de emanación de gas inflamable es igual o superior a 20 litros por kilogramo de sustancia por hora, y no cumple los criterios de la Categoría 1.
- **Categoría 3:** Toda sustancia o mezcla que, a la temperatura ambiente, reacciona lentamente en contacto con el agua de modo que el régimen máximo de emanación de gas inflamable es superior a 1 litro por kilogramo de sustancia por hora, y no cumple los criterios de las Categorías 1 y 2.

Dentro de las sustancias reportadas con reacciones peligrosas con el agua, la Nota Técnica Preventiva (NTP) 237 del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España presenta la tipología resumida en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tipologías de algunas sustancias que reaccionan en presencia de agua (INSST, 2019)

Tipología	Ejemplos	Particularidades
Metales alcalinos (Grupo 1A Tabla periódica)	Litio, Sodio, Potasio, Rubidio o Cesio.	Reacción altamente exotérmica que produce hidróxidos estables e hidrógeno. La reacción puede inflamar el hidrógeno liberado.
Metales alcalinos (Grupo 2A Tabla periódica)	Magnesio, Calcio, Estroncio o Bario.	Reacción exotérmica, puede explotar en el caso del magnesio con un impacto. También produce hidróxidos e hidrógeno.
Cinc (Grupo 2B)	Cinc en polvo	Con una masa húmeda por vapor de agua puede desprender hidrógeno susceptible a inflamación
Boro y aluminio (Grupo 3B)	Aluminio en polvo	Producen óxidos e hidrógeno que se puede inflamar

Tipología	Ejemplos	Particularidades
Silicio, titanio, circonio y hafnio (Grupo 4A y B tabla periódica)	Silicio, Titanio, Circonio y Hafnio en polvo	Producen óxidos e hidrógeno que se puede inflamar. El circonio y hafnio son más difíciles de inflamar con una baja humedad, pero en dado caso pueden reaccionar explosivamente.
Peróxidos inorgánicos	Peróxido de sodio, potasio, estroncio o bario.	Reaccionan exotérmicamente de manera violenta. Producen hidróxidos y peróxidos de hidrógeno (H_2O_2)
Óxidos inorgánicos	Óxido de cesio o calcio, trióxido de fósforo o de cloro	Reaccionan de manera exotérmica y en ocasiones muy violentas como con el peróxido de cloro. Puede formar hidrógeno fosforado que es inflamable.
Hidróxidos inorgánicos	Hidróxido de sodio o potasio	En estado sólido pueden diluirse y liberar calor
Halógenos	Flúor	El flúor reacciona de manera violenta con el agua, formando oxígeno y ácido fluorhídrico. Puede también formar en algunos casos hidratos
Haluros	Fluoruros, cloruros, bromuros y loduros	Reaccionan de manera violenta, pueden liberar sustancias ácidas o corrosivas
Hidruros	Hidruros simples y complejos como hidruro de litio, sodio, calcio, bario, boro o silicio.	Corresponden con reacciones exotérmicas que liberan hidrógeno que se puede inflamar
Ácido sulfúrico	Ácido sulfúrico	Reacciona exotérmica de forma violenta, generando subproductos corrosivos.
Sulfuros, carburo, fosfuros y nitruros	Carburo de berilio, de magnesio, cálcico o de aluminio. Nitruro de potasio, magnesio, cobre o boro.	Se pueden hidrolizar de forma exotérmica, lo que puede liberar productos inflamables como el hidrógeno y algunos subproductos tóxicos. La misma energía liberada puede inflamar los vapores generados.
Derivados alquílicos de metales y metaloides	Etil sodio, Sodio antraceno, sodio naftaleno, dimetil cinc, trietil galio, tricloroetil silicio.	Reaccionan exotérmicamente con presencia de agua
Aminas	Trimonisilamina o dicloroetil amina	Pueden reaccionar violentamente con agua sometida a bajo ciertas condiciones como presencia silicio o calentamiento externo

ANEXO 6. INFORMACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE INTENSIDAD DE FENÓMENOS NATURALES

Para la obtención de los parámetros de fenómenos naturales que aportan a la posterior obtención de la intensidad del evento o escenario específico, se cuenta con información suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA - relacionada con:

- Estudios básicos de amenaza de inundación asociada al río Aburrá entre la descarga de la quebrada La Rodas y el puente de la troncal nordeste en Barbosa. Contrato No. 1109 de 2016 - AMVA - Universidad Nacional de Colombia.

Este estudio contiene la evaluación de la amenaza por inundación a escala 1:5.000, asociada al río Aburrá y a las quebradas Piedras Blancas y La Chuscala en Copacabana, El Salado en Girardota y La López en Barbosa, las cuales constituyen los tributarios de mayor importancia en el tramo norte del río. En la siguiente ilustración se presenta la cobertura espacial del estudio y la evaluación de la amenaza por inundación asociada al río Aburrá entre la descarga de la quebrada La Rodas y el puente de la troncal nordeste en Barbosa.

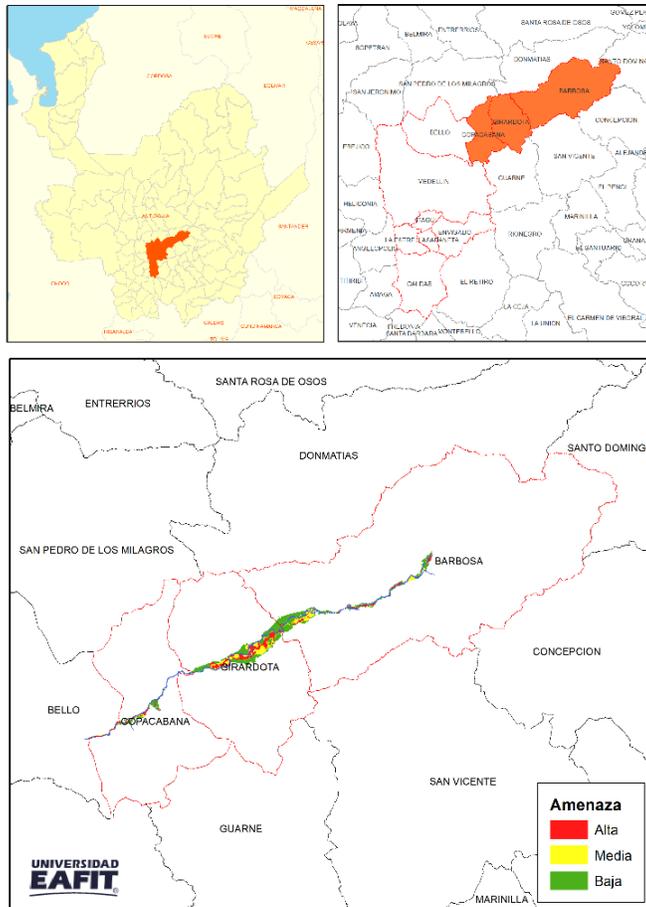


Ilustración 1. Cobertura espacial del estudio básico de amenaza por inundación asociada al río Aburrá.

A continuación, se relaciona en la Tabla 1 los datos cartográficos identificados en este estudio que aportan a la definición de parámetros de fenómenos naturales asociados con las inundaciones y la posterior obtención de la intensidad del evento o escenario específico.

Tabla 1. Datos disponibles identificados en los estudios básicos de amenaza por inundación asociada al río Aburrá.

Dato	Descripción
Modelos Digitales de Terreno - MDT	Modelos de Elevación Digital de los terrenos empleados para la modelación hidráulica del río y las quebradas relacionadas.
Mancha de inundación	Mancha de inundación asociada a un Tr de 100 años resultado de la modelación hidráulica del río y de las quebradas relacionadas para los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa.
Profundidad y velocidad del flujo de agua	Distribución de profundidades y velocidades del flujo asociadas a la mancha de inundación del río Aburrá. Tr=100 años.
	Distribución de profundidades y velocidades del flujo asociadas a la

Dato	Descripción
	mancha de inundación de la quebrada La Chuscala, La López y Piedras Blancas. Las quebradas fueron modeladas con Tr 100 años y el río con un Tr de 2.33 años.
Amenazas por inundación	Categorización de la amenaza por inundación para los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa.

- Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. Informe técnico. Contrato No. 715 de 2017 - AMVA – Universidad Nacional de Colombia.

Los estudios básicos de amenazas realizados a escala 1:5.000 para el área rural y 1:2.000 para el área urbana, cubren los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, aportando información relacionada con:

- Evaluación y zonificación de la susceptibilidad y de la amenaza.
- Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza y de riesgo.
- Evaluación de la amenaza asociada a la propagación de los movimientos en masa y el posible acoplamiento a las avenidas torrenciales.
- Evaluación de umbrales de lluvia como detonantes de movimientos en masa y avenidas torrenciales que permita establecer sistemas de alerta temprana.

En la ilustración 2 se presenta la cobertura espacial del estudio y la evaluación de la amenaza por inundación, avenida torrencial y movimientos en masa.

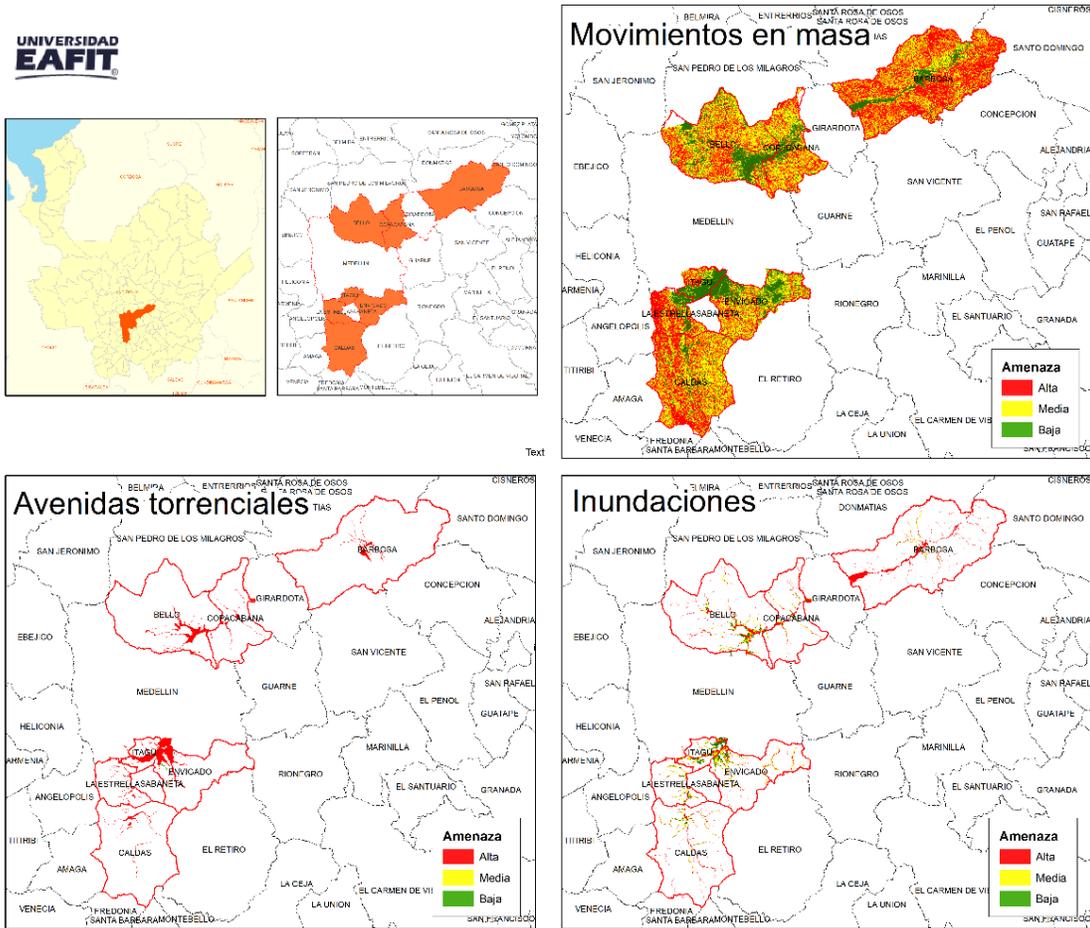


Ilustración 2. Cobertura espacial del estudio básico y la evaluación de la amenaza de inundación, avenida torrencial y movimientos en masa.

La evaluación de la amenaza por inundaciones incluye en sus análisis tramos del río Aburrá al interior de los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, y los drenajes de las quebradas que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Drenajes de quebradas analizadas por inundaciones

Municipio	Cuenca	Quebrada
Barbosa	Platanito	Platanito
	San Eugenio	San Eugenio
	Guayabal	Guayabal
	Corrientes	Corrientes
	Ovejas	Ovejas
	La López	La López
	Aguas Calientes	Aguas Calientes
El Niño	El Niño	

Municipio	Cuenca	Quebrada
	Vallecitos	Vallecitos
	Dos Quebradas	El Viento Dosquebradas
	Amoladora	Amoladora
	Las Lajas 2	Las Lajas 2
	La Tambora	La Tambora
	La Llorona	La Llorona
	Aguas Claras	Aguas Claras
	Santo Domingo	Santo Domingo
	La Chucha	La Chucha
	Agua Fría	Agua Fría
	La Montera	La Montera
	La Calda	La Calda
	El Silencio	El Silencio
	Popalito	Popalito
	El Yarumito 2	El Yarumito 2
	Cinco Reales	Cinco Reales
	Santa Rosa	Santa Rosa Los Chorros
	Reventón	Reventón
	Las Peñas	Las Peñas
	El Hoyo	El Hoyo
	El Guadual	El Guadual
	Los Perros	Los Perros
	La Ese	La Ese
	Los Laureles	Los Laureles
	La Cachona	La Cachona
	Los Totumos	Los Totumos
	Las Lajas	Las Lajas
	Cañada Negra	Cañada Negra
	Santa Rita	Santa Rita
	La Vela	La Vela
	La Camila	La Camila
	Rodas	Rodas
	Los Escobares	Los Escobares
	La Maquina	La Maquina
	La Seca	La Seca
	Señorita	Señorita (este) Señorita (oeste)
Bello		Chagualones
		Pachelly
		Chachafruto
	La García	La Chiquita
		La García
		El Barro
		La Avelina
		El Hato
	El Hato	La Ortega
	La Loca	La Loca
		La Montañita
	La Madera	La Madera

Municipio	Cuenca	Quebrada	
Caldas	Aburrá	Aburrá	
	La Clara	La Clara	
	La Brunera	La Brunera	
	El Zarzo	El Zarzo	
	La Corralita	La Corrala La Corralita	
	La Miel	La Miel La Romera	
	La Raya	La Manuela La Raya	
	La Cano	La Cano	
	La Aguacatala	La Aguacatala	
	La Valeria	La Valeria	
	Reventona	Reventona o Chuscala	
	Mandalay	Mandalay	
	La Lejía	La Lejía	
	La Salada	La Salada	
	La Mina	La Mina	
	Amagá	Amagá	
	Sinifaná	Sinifaná	
Copacabana	La Rodas	La Rodas	
	La Trinidad	La Trinidad	
	El Convento	El Convento	
	Piedras Blancas	Piedras Blancas	
	Las Catas	Las Catas	
	La Chuscala	La Chuscala	
	El Limonal	El Limonal	
	Los Aguacates	Los Aguacates	
	La Teneria	La Teneria	
	La Sucia	La Sucia	
	La Tolda	La Tolda	
Envigado	Los Escobares	Los Escobares	
	La Mina	La Sucia La Heliadora o La Peña La Mina	
	La Ayurá	El Salado La Miel La Ayurá La ahuyamera La Sebastiana La Honda La Zuñiga	
	Las Palmas	Las Palmas	
	Espíritu Santo	Espíritu Santo	
	La Estrella	La Muerte	La Muerte
		Miraflores	Miraflores
Doña María		La Ospina o La Muñoz	
La Estrella		La Estrella	
La Grande		La Chocha La Grande	
La Sillera		La Sillera	

Municipio	Cuenca	Quebrada
	La Bermejala	La Bermejala
		La Llorona
	La Culebra	La Culebra
	San Miguel	San Miguel
Itagüí	La Raya	La Raya
		La Manuela
	Doña María	La Ospina o La Muñoz
		La Justa
		La Limona
		Doña María
		La Tablaza
	Sesteadero	La Pampa
		Peladeros
		Los Gómez
		Sesteadero

Para el análisis de amenazas por avenidas torrenciales, este estudio incluye en sus análisis los drenajes de las quebradas que se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Drenajes de quebradas analizadas por avenidas torrenciales

Municipio	Cuenca	Quebrada	
Barbosa	La López	La López	
	Aguas Calientes	Aguas Calientes	
	El Niño	El Niño	
	Dos Quebradas	Dosquebradas	
		El Viento	
	Santa Rosa	Santa Rosa	
	Reventón	Reventón	
	Las Peñas	Las Peñas	
Bello	Cañada Negra	Cañada Negra	
	Santa Rita	Santa Rita	
	Rodas	Rodas	
	Los Escobares	Los Escobares	
		La Seca	
	Señorita	La Señorita (Este)	
		La Señorita (Oeste)	
	La García	Chagualones	
		Pachelly	
		Chachafruto	
		La Chiquita	
		La García	
		EL Barro	
		La Avelina	
		El Hato	El Hato
			La Ortega
	La Loca	La Loca	
La Madera	Montañita		
	La Madera		
Caldas	La Brunera	La Brunera	
	La Corralita	La Corrala	

Municipio	Cuenca	Quebrada
		La Corralita
	La Miel	La Miel
		La Romera
	La Raya	La Manuela
		La Raya
	La Cano	La Cano
	La Aguacatala	La Aguacatala
	La Valeria	La Valeria
	Reventona	Reventona
	Mandalay	Mandalay
Copacabana	El Limonal	El Limonal
	Los Aguacates	Los Aguacates
	La Sucia	La Sucia
	La Tolda	La Tolda
	Los Escobares	Los Escobares
	Rodas	Rodas
	La Trinidad	La Trinidad
	Piedras Blancas	Piedras Blancas
	La Chuscala	La Chuscala
Envigado	La Mina	La Sucia
		La Heliodora o La Peña
		La Mina
	La Miel	El Salado
		La Miel
		Ayurá
		Ahuyamera
		Sebastiana
		Honda
		Zúñiga
La Estrella	La Estrella	La Estrella
	La Elvira	La Elvira
	Miraflores	Miraflores
	Tablacita	Tablacita
	San Miguel	San Miguel
	La Raya	La Raya
		La Manuela
	Doña María	La Ospina o La Muñoz
	La Grande	La Grande
		La Chocha
	La Culebra	La Culebra
	La Bermejala	La Bermejala
		La Llorona
Itagüí	Doña María	La Ospina o La Muñoz
		La Justa
		La Limona
		Doña María
		La Tablaza
	Sesteadero	La Pampa
		Peladeros
		Los Gómez
		Sesteadero

El resultado de este estudio aporta elementos y datos cartográficos para la definición de parámetros de fenómenos naturales asociados con los movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para la determinación de la intensidad del evento o escenario específico. En la Tabla 4 y Tabla 5 se relacionan los datos cartográficos identificados en este estudio que aportan a la definición de estos fenómenos naturales.

Tabla 4. Datos disponibles identificados en los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en los municipios del Valle de Aburrá.

Dato	Descripción
Profundidad y velocidad del flujo de agua	Profundidades y velocidad del flujo obtenidas a partir de la simulación de los caudales asociados a Tr 25, 50, 100 y 500 años

Tabla 5. Datos disponibles identificados en los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa en los municipios del Valle de Aburrá

Dato	Descripción	Parámetro/Tipo
Parámetros de resistencia, tipo de suelo y parámetros hidráulicos	Contiene los parámetros de resistencia, tipo de suelo y parámetros hidráulicos, consignados con su respectiva media y desviación estándar; seleccionadas a partir de la información secundaria investigada. Parámetros asignados a cada unidad geológica superficial.	Código de las unidades geológicas
		Nombre de las unidades geológicas
		Ángulo de fricción
		Cohesión
		Peso unitario del suelo
		Clasificación de suelo según SUCS (SUCS: Unified Soil Classification System)
		Permeabilidad saturada
Variables continuas	Caracterización del terreno	Espesores
		Alturas sobre el nivel del mar Pendientes

Implementación parámetros de intensidad para movimientos en masa

Para realizar el análisis de los parámetros de intensidad de movimientos en masa, se contó con la información extraída de los ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN LOS MUNICIPIOS DE CALDAS, LA ESTRELLA, ENVIGADO, ITAGÜÍ, BELLO, COPACABANA Y BARBOSA, PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL y del mapa de riesgo químico, actualizado en el año 2017, la cual cuenta con 296 instalaciones en el Valle de Aburrá (AMVA - UNIANDES, 2017).

A partir de la información cartográfica disponible de las instalaciones identificadas a partir del mapa de riesgo químico y el inventario suministrado por el Área Metropolitana de Valle de Aburrá - AMVA, se logran identificar 83 instalaciones con datos completos de equipos de operación, proceso o almacenamiento y actividades económicas, las cuales se convierten en objeto de la presente evaluación.

Tabla 6. Instalaciones con datos completos de equipos de operación

Municipio	Número de instalaciones
BARBOSA	6
BELLO	8
CALDAS	2
COPACABANA	6
GIRARDOTA	9
ITAGÜÍ	34
LA ESTRELLA	6
MEDELLÍN	5
SABANETA	7
Total general	83

Con la localización de las instalaciones, y bajo la consideración de seleccionar aquellas que contaran con la información que permitiera realizar los análisis de los parámetros de intensidad (parámetros del suelo, curvas de nivel), se clasificaron inicialmente localizándolas de acuerdo a la Ilustración 3, para esto se analiza la pendiente promedio del terreno donde se ubica cada instalación, tomando el raster de pendientes y se reclasifica con el fin de diferenciar las pendientes inferiores a 15° (zona 1 o 3), y pendientes superiores a 15° (zona 2), así se encontró que 10 de estas se asocian a la zona 2 (ladera potencialmente inestable) y 9 a la zona 3 (zona de la trayectoria del movimiento), las instalaciones restantes se encuentran en la zona 1 o 4.

Tabla 7. Zonas o escenarios de exposición de las diferentes instalaciones para movimientos en masa

Zona de exposición	Nombre de la instalación
ZONA 2	COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A
	CUEROS Y DISEÑOS S.A.S.
	DISOLVAN Y CÍA. S.A.S
	EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO
	FÁBRICA DE HILOS Y PRODUCTOS VARIOS FAHILOS SA
	GASES DE ANTIOQUIA S.A. E.S.P.
	INDUSTRIAS HACEB S.A.
	INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.
	OSPINA GRASAS Y PIELES LTDA
	ZUSATEX S.A.S
ZONA 3	ANHIDRIDOS Y DERIVADOS DE COLOMBIA S.A. ANDERCOL
	BYCSA S.A.
	CERVECERÍA UNIÓN S.A
	DYNA Y CIA S.A.
	ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.
INVATAM S.A.	

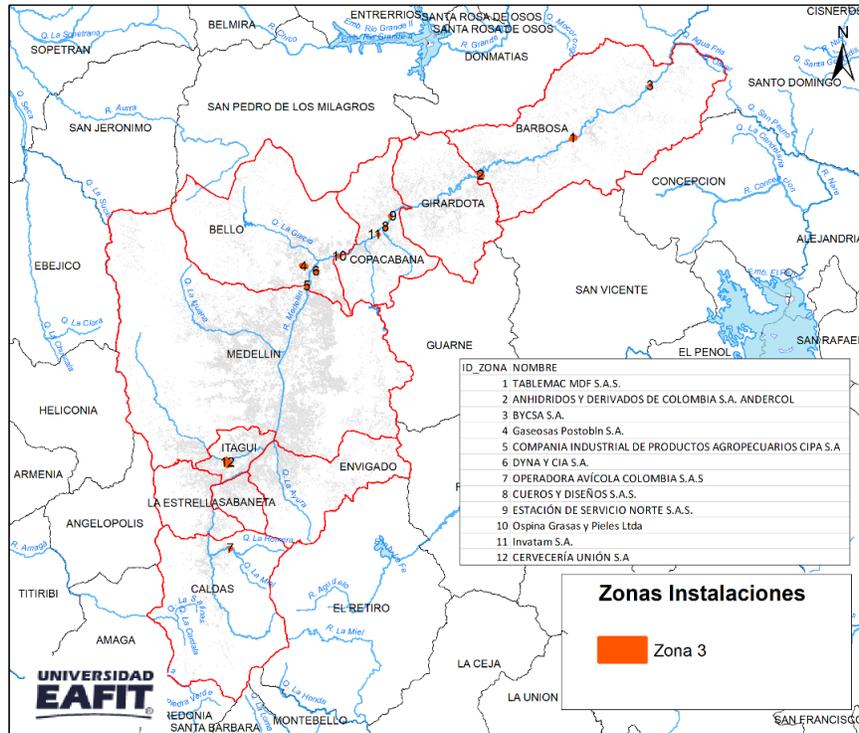


Ilustración 4. Instalaciones localizadas en la zona 3 de movimientos en masa

Una vez se contó con esta zonificación para las diferentes instalaciones, se procedió a realizar la estimación de los parámetros de intensidad para cada instalación:

INSTALACIONES ZONA 2 POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para estas instalaciones, el parámetro de intensidad viene dado por la confiabilidad o la probabilidad de falla, asociada al factor de seguridad, sin embargo, de acuerdo con la información de los estudios básicos de amenaza del AMVA, no se cuenta con dicha información para la toma de decisiones.

Debido a lo anterior, se procede a realizar un análisis de estabilidad en el cual se involucren estas instalaciones, el cual se realizará igualmente con la información de los estudios básicos, a continuación, se presenta el análisis realizado:

Inicialmente se traza un perfil por cada instalación, sobre el cual se plasman los parámetros de los materiales definidos en los estudios básicos de amenaza y se realiza el análisis de estabilidad para cada perfil.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price para el presente análisis) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud.

Dentro de las 10 instalaciones identificadas en la zona 2, se encuentran dos (2) instalaciones que no cuentan con el valor de Índice de Confiabilidad (IC), por lo tanto para determinar la intensidad por movimientos en masa para estas instalaciones se realizó el

análisis de estabilidad partiendo de la información de los estudios básicos, con el fin de definir los parámetros de decisión para este caso, para las demás instalaciones se tomó el valor de intensidad (IC) estimado en los estudios mencionados.

Para evaluar la estabilidad de cada sector se consideraron las siguientes situaciones: inicialmente se analizó el modelo considerando el factor detonante lluvia, este factor se asoció para este ejercicio al valor del coeficiente de presión de poros, ru , tomando como base el peso unitario de los materiales involucrados, este valor se estima tenga un valor máximo que varíe entre 0.48 y 0.52, por lo cual se toma en el presente análisis un valor estimado de $ru=0.25$ para periodos de retorno de 50 años y $ru=0.5$ para periodos de retorno de saturación de 500 años (condición de saturación crítica), en los estudios de detalle estos valores deberán ser justificados.

De acuerdo a la geología regional, estas instalaciones se encuentran en la unidad dunitas de Medellín, a continuación, se presentan los parámetros geotécnicos utilizados para el análisis de estabilidad

Tabla 8. Parámetros geotécnicos de las unidades geológicas

Unidad Geológica-geotécnica	Tipo de suelo*	Ángulo de fricción °		Cohesión kPa		Peso unitario kN/m3	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ
Dunitas de Medellín	ML	22,00	2,22	10,00	4,00	19,00	3,90

Con los perfiles obtenidos, las condiciones de los detonantes y los parámetros geotécnicos, se realizan los análisis de estabilidad, obteniendo para la instalación INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P. que bajo el escenario de detonante lluvia, para un periodo de retorno de 50 años se obtiene una probabilidad de falla de 93.3% (0.93) y de 100% (1.0) para el periodo de retorno de 500 años.

En las siguientes ilustraciones se pueden visualizar los resultados obtenidos:

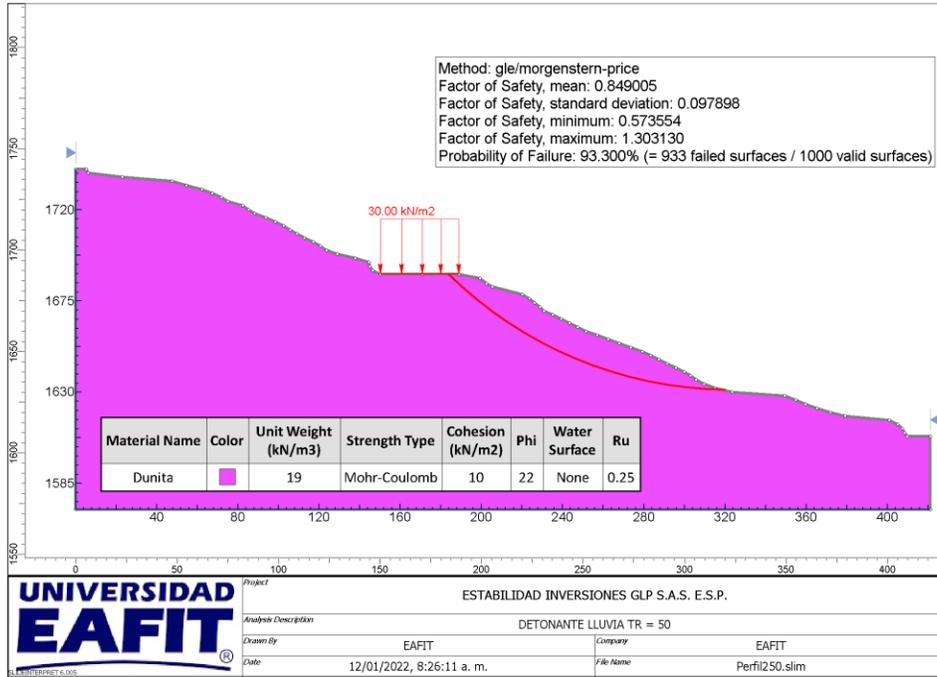


Ilustración 554. Estabilidad detonante lluvia Tr 50 años, INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.

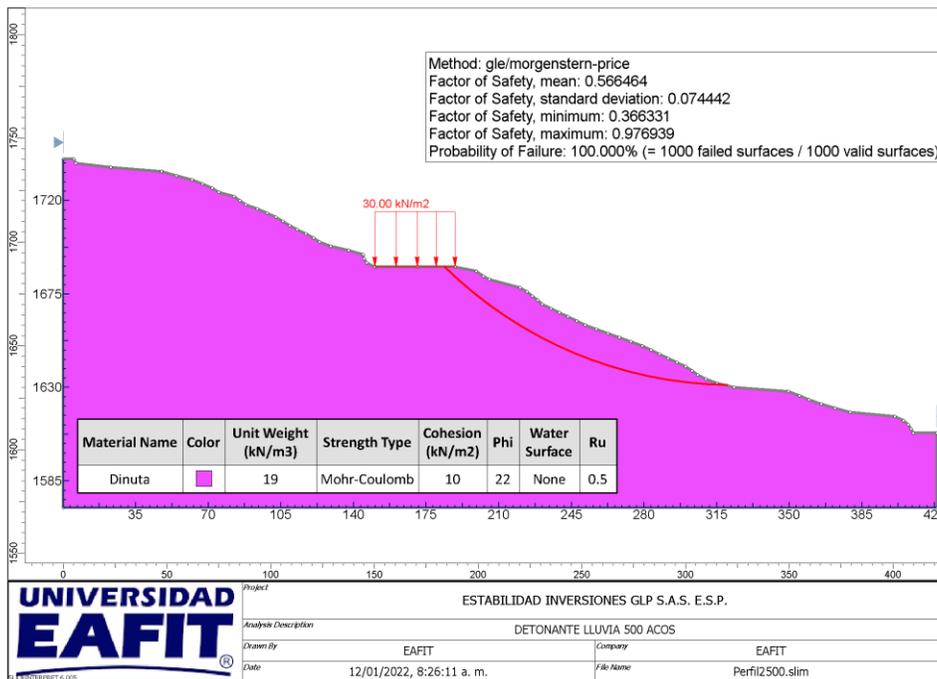


Ilustración 6. Estabilidad detonante lluvia Tr 500 años, INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.

Se procede igualmente para la instalación Gases de Antioquia S.A. E.S.P., en este análisis se tiene que esta instalación se encuentra entre dos taludes, el talud superior con una altura de 52 metros y una pendiente de 37°, por lo que se considera que para dicho talud la instalación puede estar en la zona 3 (zona de RUNOUT), para el talud inferior, dada la cercanía de la instalación al borde del mismo, se realiza el análisis de estabilidad considerando zona 2, obteniendo para todos los escenarios evaluados probabilidades de falla del 100%.

Para las dos instalaciones evaluadas, teniendo en cuenta que ambas tienen taludes en la parte superior de la instalación, se realiza adicionalmente la evaluación de la zona 3, definiendo entonces que se le asignará a cada uno el escenario más crítico de ambas evaluaciones.

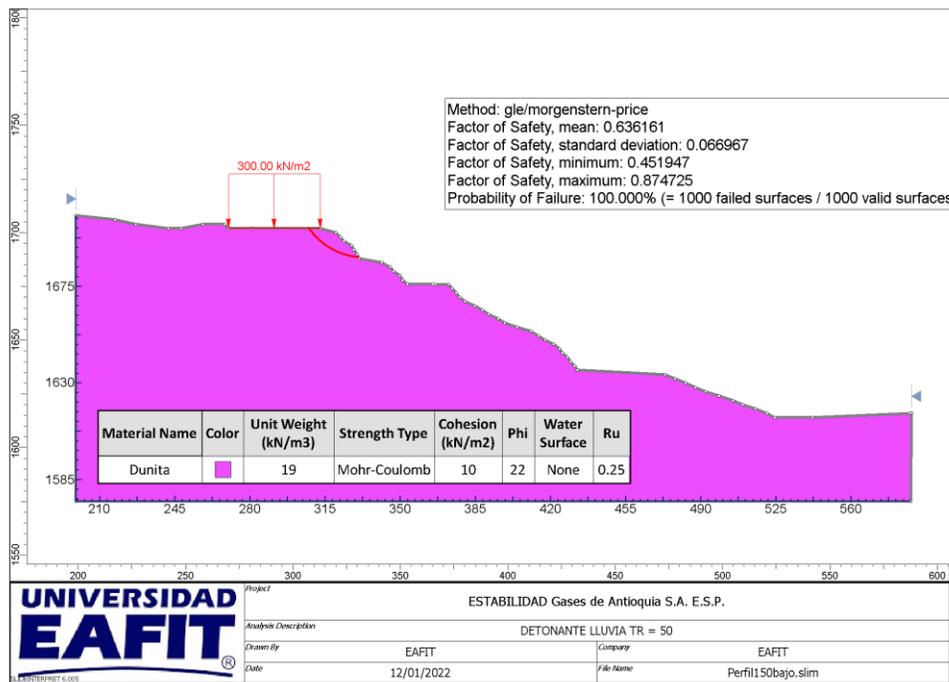


Ilustración 7. Estabilidad detonante lluvia Tr 50 años, Gases de Antioquia S.A. E.S.P

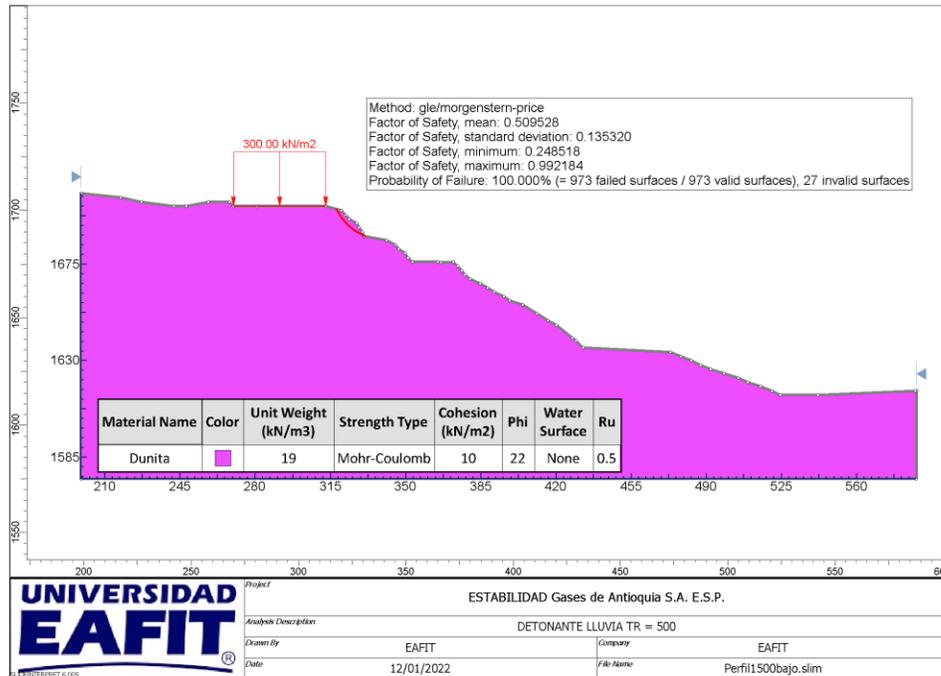


Ilustración 8. Estabilidad detonante lluvia Tr 500 años, Gases de Antioquia S.A. E.S.P

Al realizar el producto entre la probabilidad de falla asociada al índice de confiabilidad y la probabilidad del periodo de retorno, se tiene que para valores superiores a 0.01 (PF > 0.01/año) el nivel de amenaza es alto, valores entre 0.0002 y 0.01/año) se clasifican con nivel de amenaza media y valores de probabilidad de falla menores a 0.0002 (PF < 0.0002) se definen con nivel de amenaza bajo, para las instalaciones que contaban con el análisis de IC se asignó un valor de 0.5 para aquellos que estuvieran con IC alto y de 0.01 para los IC bajo.

Tabla 9. Cálculo Amenaza instalaciones Zona 2

Nombre	Tr (años)	PF (adim)	Amenaza
GASES DE ANTIOQUIA S.A. E.S.P.	50	0.933	ALTO
	500	1	MEDIO
INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.	50	1	ALTO
	500	1	MEDIO
COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A	10	0.5	ALTO
	100	0.5	MEDIO
CUEROS Y DISEÑOS S.A.S.	10	0.5	ALTO
	100	0.5	MEDIO
DISOLVAN Y CÍA. S.A.S	10	0.5	ALTO
	100	0.5	MEDIO
EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO	10	0.3	ALTO
	100	0.3	MEDIO
FÁBRICA DE HILOS Y PRODUCTOS VARIOS FAHILOS SA	10	0.001	BAJO
	100	0.001	BAJO

Nombre	Tr (años)	PF (adim)	Amenaza
INDUSTRIAS HACEB S.A.	10	0.5	ALTO
	100	0.5	MEDIO
OSPINA GRASAS Y PIELES LTDA	10	0.001	BAJO
	100	0.001	BAJO
ZUSATEX S.A.S	10	0.3	ALTO
	100	0.3	MEDIO

INSTALACIONES ZONA 3 MOVIMIENTOS EN MASA

Como se mencionó anteriormente, en esta zona de acuerdo con el análisis de pendientes, se encontraron 12 instalaciones que cumplen con el criterio para ubicarlas allí, sin embargo, con base en el numeral 4.4.1, se estima el valor de d (distancia de viaje), y con base en la distancia D (distancia horizontal desde la parte alta del talud hasta la instalación), se determina si la instalación se encuentra finalmente en la zona 3 o zona 4.

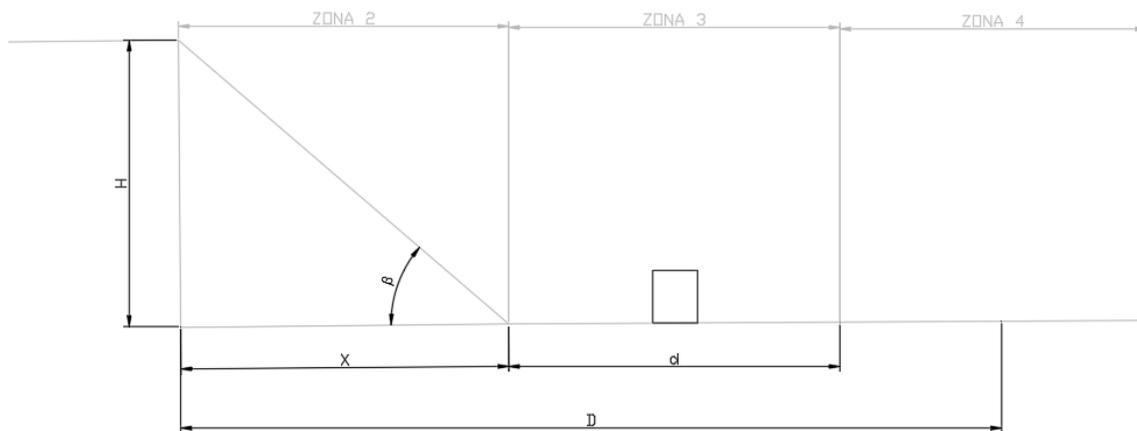


Ilustración 9. Esquema: Instalación Zona 3

Una vez definida la zona en la cual se encuentra la instalación, se procede a estimar la velocidad de la masa de suelo en el punto de la instalación, para el espesor se toma el espesor promedio de suelo tomado de los estudios básicos de amenaza del AMVA, finalmente, se calcula el parámetro de intensidad, que para este caso corresponde al flujo de momento, definido como el producto de la profundidad de la masa de suelo desplazada y el cuadrado de la velocidad máxima de flujo en un punto dado (hv^2).

Tabla 10. Parámetros geotécnicos de las unidades geológicas utilizados para la estimación de los parámetros de intensidad por movimientos en masa zona 3.

Unidad geológica	Código	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso unitario (kN/m^3)	K (m/s)
Anfibolita granatífera de Caldas	PZagC	30.00	10.00	18.00	1.E-06
Anfibolitas de Medellín	TRaM	30.00	10.00	18.00	5.E-08

Unidad geológica	Código	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso unitario (kN/m ³)	K (m/s)
Anfibolitas del Alto de Minas	PZaAM	30.00	10.00	18.00	6.E-06
Batolito Antioqueño	KcdA	26.00	10.00	17.86	5.E-08
Depósito aluvial	Qal	22.50	5.00	19.00	5.E-05
Depósito aluviotorrencial	Qat	32.00	5.00	19.00	5.E-05
Depósito de deslizamiento reciente	Qdr	19.00 – 31.18	10.00 – 15.00	14.90 – 16.40	0 -1.E-07
Depósito de vertiente I	QvI	22.50 – 25.20	15.00 – 20.00	16.20 – 19.50	1.E-06
Depósito de vertiente II	QvII	22.00 – 24.20	15.00 – 21.00	16.20 – 19.50	1.E-06
Depósito de vertiente III	QvIII	17.50 – 23.83	13.00 – 20.00	16.40 – 20.50	1.E-06
Depósito de vertiente IV	QvIV	20.00 – 30.00	7.90 – 17.00	16.20 – 19.50	1.E-06
Dunitas de Medellín	JKuM	22.00	10.00	19.00	1.E-06
Esquistos anfibólicos de Baldias	TReaB	27.00	10.00	18.17	1.E-04
Esquistos de Cajamarca	TReC	18.50	20.00	18.17	1.E-06
Esquistos de Caldas	PZeC	18.50	20.00	18.17	1.E-06
Gabros de Copacabana	KgC	21.48	9.58	14.30	5.E-08
Gabros de Romeral	JgR	21.48	9.58	14.30	1.E-06
Gneis de La Ceja	TRgLC	25.60	19.96	15.90	1.E-06
Gneis Milonítico de Sajonia	JKgmS	25.60	19.96	17.43	5.E-04
Llenos antrópicos	QII	30.00	7.90	19.00	1.E-08
Metabasitas del Picacho	JKmbP	21.48	15.00	14.30	1.E-06
Miembro volcánico	KvQG	19.00	27.00	20.00 – 30.00	5.E-08
Miembro Volcanosedimentario	KvsQG	25.00	22.00	18.50	5.E-08
Migmatitas de Puente Pelaez	TRmP P	27.50	10.00	17.40	6.E-06
Peridotita de Romeral	JuR	24.00	10.00	13.90	1.E-06
Río Aburrá	Río Aburr	0.00	0.00	0.00	1.E-08
Stock de Altavista	KdA	13.63	18.00	16.72	1.E-06
Stock de Amagá	TRgA	26.00	10.00	15.73	1.E-02
Tonalita de Ovejas	KtO	26.00	10.00	17.86	1.E-06

Como el factor detonante es la lluvia, este factor se asocia al valor del coeficiente de presión de poros, r_u , tomando como base el peso unitario de los materiales involucrados, estos valores pueden variar entre 0.48 y 0.52, por lo cual se toma en el presente análisis un valor estimado de $r_u=0.25$ para periodos de retorno de 50 años y $r_u=0.5$ para periodos de retorno de 500 años (condición de saturación crítica), en los estudios de detalle estos valores deberán ser justificados, con base en esto y aplicando las recomendaciones de Iverson (1997) se ajustó el valor L/H, encontrando que el mismo se encuentra entre 2.3 y 5.5 para periodos de retorno de 50 años y entre 3.5 y 8.5 para periodos de retorno de 500 años.

Aplicando lo consignado en 4.4.1, se estimó la velocidad en el tramo AB (talud) para estas instalaciones, y la distancia de viaje (runout), finalmente se calculó la velocidad en el punto de la instalación, obteniendo que algunas de las instalaciones (dependiendo del periodo de retorno) se encontraban en la zona 4, dado que su distancia al talud era superior que la distancia de viaje estimada. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el análisis mencionado:

Tabla 11. Cálculo parámetro de Intensidad HV2(Tr 50 años)

Instalación	Vab (m/s)	D (m)	Distancia base talud a instalación (m)	V Instalación (m/s)	H (m)	Hv2 (m ³ /s ²)	Zona	Amenaza
ANHIDRIDOS Y DERIVADOS DE COLOMBIA S.A. ANDERCOL	35.0	150.6	229.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
BYCSA S.A.	7.4	6.8	13.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
CERVECERÍA UNIÓN S.A	30.6	76.4	59.00	14.60	0.2	42.60	ZONA 3	ALTO
DYNA Y CIA S.A.	27.4	92.5	393.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.	5.6	4.3	17.00	0.00	1.85	0.00	ZONA 4	BAJO
INVATAM S.A.	0.4	0.0	0.00	0.40	1.85	0.30	ZONA 3	MEDIO
OPERADORA AVÍCOLA COLOMBIA S.A.S	13.7	23.0	0.00	13.67	0.2	37.35	ZONA 3	ALTO
TABLEMAC MDF S.A.S.	11.5	16.3	66.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
GASES DE ANTIOQUIA S.A. E.S.P.	29.5	109.5	103.80	6.72	10	452.17	ZONA 3	ALTO
INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.	17.0	36.4	0.00	16.98	0.85	245.01	ZONA 3	ALTO
TINTURAS Y TELAS S.A.S	15.6	33.2	0.00	15.61	1.85	450.90	ZONA 3	ALTO

Tabla 12. Cálculo parámetro de Intensidad HV2(Tr 500 años)

Instalación	Vab (m/s)	D (m)	Distancia base talud a instalación (m)	V instalación (m/s)	H (m)	Hv2 (m ³ /s ²)	Zona	Amenaza
ANHIDRIDOS Y DERIVADOS DE COLOMBIA S.A. ANDERCOL	43.2	229.8	229.00	2.53	0.2	1.28	ZONA 3	MEDIO
BYCSA S.A.	14.1	24.4	13.00	9.64	0.2	18.59	ZONA 3	ALTO

Instalación	Vab (m/s)	D (m)	Distancia base talud a instalación (m)	V instalación (m/s)	H (m)	Hv2 (m3/s2)	Zona	Amenaza
CERVECERÍA UNIÓN S.A	31.7	82.0	59.00	16.78	0.2	56.29	ZONA 3	ALTO
DYNA Y CIA S.A.	30.8	116.8	393.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.	9.3	11.7	17.00	0.00	1.8	0.00	ZONA 4	BAJO
INVATAM S.A.	8.6	10.2	0.00	8.63	1.8	137.93	ZONA 3	ALTO
OPERADORA AVÍCOLA COLOMBIA S.A.S	20.6	52.4	0.00	20.64	0.2	85.21	ZONA 3	ALTO
TABLEMAC MDF S.A.S.	19.4	46.5	66.00	0.00	0.2	0.00	ZONA 4	BAJO
GASES DE ANTIOQUIA S.A. E.S.P.	32.7	134.5	103.80	15.61	10	2437.26	ZONA 3	ALTO
INVERSIONES GLP S.A.S. E.S.P.	22.3	62.7	0.00	22.30	0.8	422.54	ZONA 3	ALTO
TINTURAS Y TELAS S.A.S	17.6	42.0	0.00	17.55	1.8	570.00	ZONA 3	ALTO

Implementación parámetros de intensidad para inundaciones y avenidas torrenciales

Una vez definido el planteamiento metodológico con el fin de clasificar la amenaza por inundación y avenidas torrenciales, y en función de la intensidad, se realizó el análisis en toda la zona de interés correspondiente al Valle de Aburrá, con especial énfasis en los municipios que contaban con datos de profundidad y velocidad (Caldas, La Estrella, Itagüí, Sabaneta, Envigado, Bello, Copacabana y Girardota).

En primer lugar, se estimó el valor de la intensidad para los periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años como hv^2 (profundidad por el cuadrado de la velocidad), cálculo que se adelanta a partir de la resolución de los raster disponibles para la profundidad y velocidad en los estudios disponibles, cuyo tamaño es de 0,50 m por 0,50 m para cada pixel.

Es importante tener en consideración que la información de las empresas o instalaciones disponible para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá corresponde al polígono o delimitación del área de la misma, sin discriminar las diferentes áreas que la componen, tales como oficinas, zonas comunes, localización de elementos tecnológicos, entre otros y por ello, el análisis se realizó para el polígono total de cada empresa. Ahora, para realizar el cálculo de la intensidad, se tomaron los periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, estimando un valor de la intensidad en cada uno de los pixeles asociados al campo de profundidad y velocidad que presentó incidencia dentro de las empresas evaluadas (83 en total). Es importante mencionar que algunas de las empresas no se encontraron dentro del

área de inundación para las corrientes evaluadas y por ello, no presentan un cálculo o valor de intensidad para algún periodo de retorno.

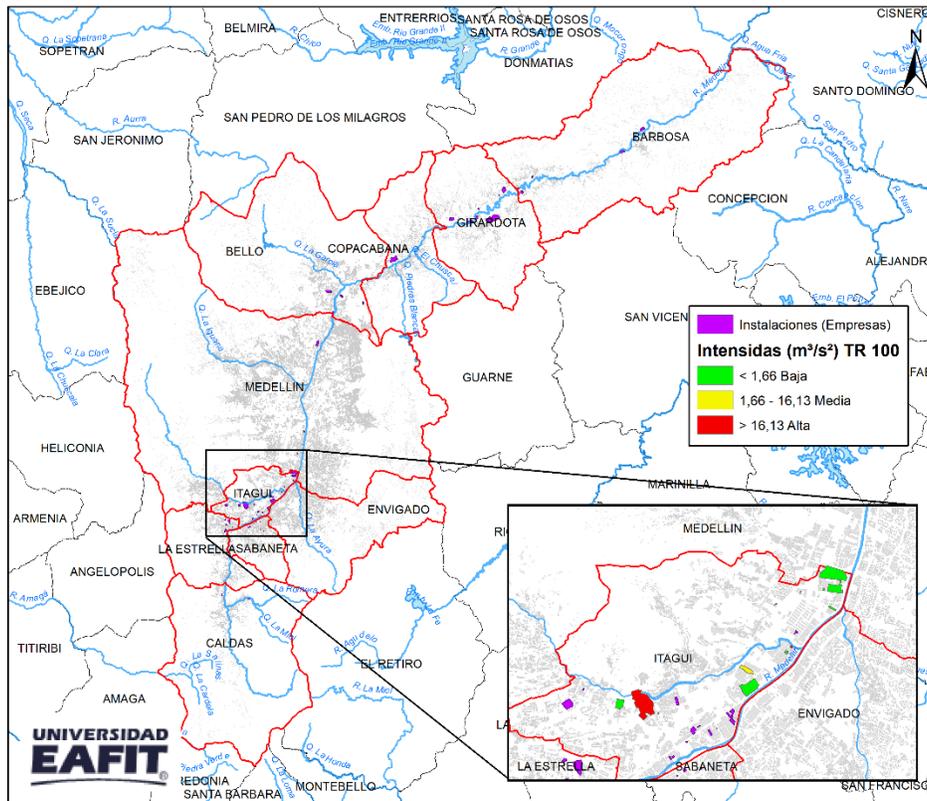


Ilustración 10. Cálculo de la intensidad para el periodo de retorno de 100 años.

A partir del cálculo de la intensidad para cada periodo de retorno de interés (25, 50, 100 y 500 años), se pudo obtener un total de 33 empresas de las 83 que presentan incidencia de la amenaza natural relacionada con inundaciones y avenidas torrenciales, donde según el valor estimado de la intensidad para los periodos de retorno, se procedió a la clasificación de las mismas según el rango establecido, el cual permite determinar el rango en el que se encuentra cada empresa según el escenario (inundación o avenidas torrenciales), y a partir del valor estimado en cada uno de los periodos de retorno, se puede determinar la categorización de la amenaza para las inundaciones y avenidas torrenciales.

En la ilustración 10, se presente el cálculo de la intensidad específicamente para el periodo de retorno de 100 años, procedimiento que también fue estimado para los periodos de retorno de 25, 50 y 500 años. En la aplicación del procedimiento, se pudo establecer la clasificación de cada empresa según la intensidad calculada en baja, media y alta. Ahora, contando con el cálculo de la intensidad y según el periodo de retorno, se puede presentar gráficamente la distribución de la amenaza por inundación y avenida torrencial según la clasificación de cada empresa evaluada, información que se muestra en la ilustración 11.

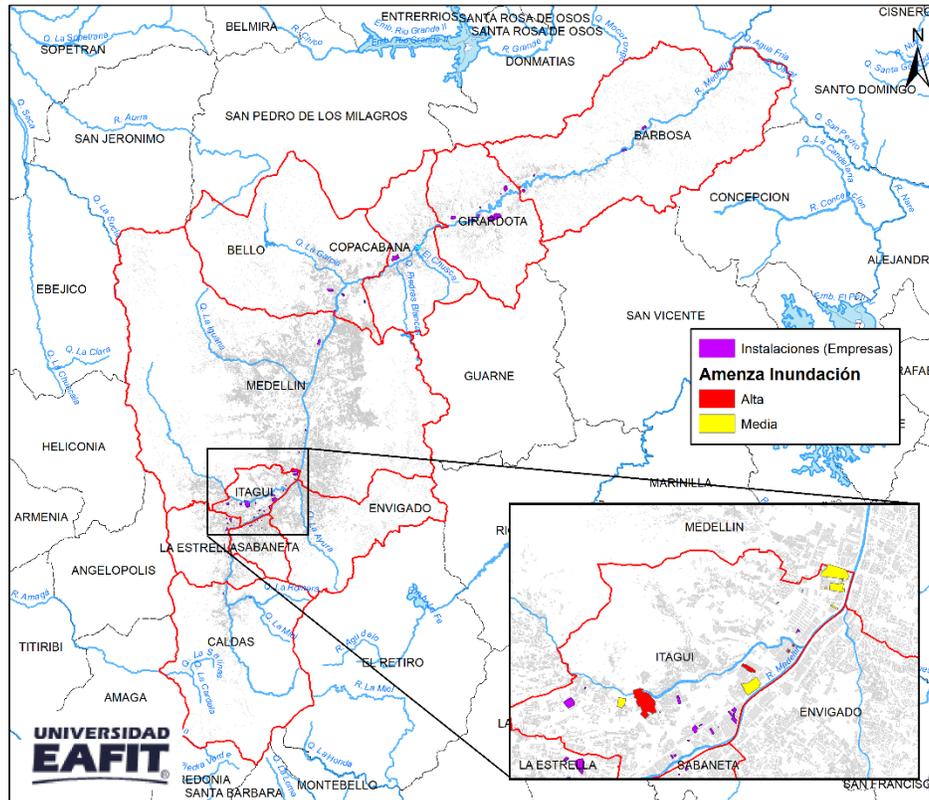


Ilustración 11. Clasificación de la amenaza por inundación.

Considerando que solo se cuenta con información de la delimitación de las empresas o industrias de forma general, sin precisión de las zonas que pueden generar un evento Natech (áreas de tanques, calderas, equipos, entre otros), se realizó el cálculo de la intensidad para cada empresa y cada periodo de retorno como el valor máximo estimado dentro del polígono que delimita la empresa, esto como condición más desfavorable dentro de los análisis realizados.

El resultado obtenido en cuanto al cálculo de la intensidad y la clasificación de la amenaza es mostrado en la Tabla 13, para inundación y avenidas torrenciales.

Tabla 13. Cálculo de la intensidad y la amenaza en empresas y para eventos de inundación y avenidas torrenciales.

ID	Nombre	Intensidad I (m ³ /s ²) TR				Amenaza	
		25	50	100	500	Inundación	Torrenciales
1	PROQUIMCOL S.A.	0.000	52.55	63.37	47.32	Media	Media
2	TINTURAS Y TELAS S.A.	99.24	52.55	63.37	47.32	Alta	Media
3	GASEOSAS POSTOBLN S.A.	23.71	26.57	29.62	40.63	Alta	Media
4	SOLLA S.A.	17.92	20.63	23.56	38.14	Alta	Media

ID	Nombre	Intensidad I (m ³ /s ²) TR				Amenaza	
		25	50	100	500	Inundación	Torrencial
5	COMPANIA INDUSTRIAL DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS CIPA S.A.	38.53	37.83	45.86	68.46	Alta	Media
6	DYNA Y CIA S.A.	5.944	7.019	8.252	23.33	Alta	Media
7	COMERPA DE MEDELLIN S.A.S.	16.33	28.17	25.13	74.06	Alta	Media
8	INCAMETAL S.A.S.	5.944	7.019	8.252	23.33	Alta	Media
9	ESTACIÓN DE SERVICIO NORTE S.A.S.	33.762	37.45	40.69	57.23	Alta	Media
10	OSPINA GRASAS Y PIELES LTDA	124.65	160.71	10.86	197.00	Alta	
11	CENTRAL QUIMICA S.A.S.	1.732	1.907	0.440	3.586	Alta	Media
12	CERVECERÍA UNIÓN S.A.	109.68	118.84	134.12	156.64	Alta	
13	COLOMBINA SA	1.929	2.489	0.714	3.609	Alta	Media
14	FÁBRICA DE LICORES Y ALCOHOLES DE ANTIOQUIA	1.444	1.725	1.401	2.551	Media	Media
15	EMPRESA DE COSMETICOS Y SERVICIOS S.A SEMCO	7.558	6.843	109.55	6.015	Alta	Media
16	INDUSTRIAS FATELARES S.A.S	2.038	1.953	3.004	2.406	Alta	Media
17	TINTEXA S.A.	1.961	2.518	0.423	3.609	Alta	Media
18	COMPAÑIA COLOMBIANA DE CERAMICA S.A.S.	37.04	41.59	242.97	70.39	Alta	
19	COLOMBIANA KIMBERLY COLPAPE S.A.	.	.	0.050	0.000	Media	Alta
20	ARCTEX TINTORERÍA S.A.S	.	.	0.035	0.000	Media	Alta
21	FINCA S.A.S	.	.	0.480	0.000	Media	Alta
22	CUEROS Y DISEÑOS S.A.S.	.	.	2.322	.	Media	.
23	DISOLVAN Y CÍA. S.A.S	.	.	9.464	.	Media	.
24	COMPAÑÍA DE EMPAQUES S.A.	.	.	0.030	.	Media	.
25	COLTEJER S.A.	.	.	0.030	.	Media	.
26	ESPUMAS PLÁSTICAS S.A.	.	.	0.003	.	Media	.
27	FÁBRICA DE ARTICULOS DE PROTECCION SAS	.	.	0.019	.	Media	.
28	GONVARRI COLOMBIA S.A.	.	.	0.005	.	Media	.
29	HERRAJES GAHER S.A.S	.	.	0.323	.	Media	.
30	PROCESOS Y TERMINADOS DE CONFECCIONES S.A.S	.	.	0.033	.	Media	.
31	INVERSIONES Y SERVICIOS NEAM E.U.	.	.	0.140	.	Media	.
32	PARAPLÁSTICOS S.A.S	.	.	0.006	.	Media	.
33	TECNAS S.A.	.	.	0.006	.	Media	.

Los resultados obtenidos permiten clasificar de las 33 empresas con incidencia en las crecientes de las corrientes con información disponible, un total de 17 empresas con clasificación de amenaza media por inundación y 16 empresas como amenaza alta. En cuanto a la amenaza por avenidas torrenciales, se tiene un total de 15 empresas clasificadas como medias y 3 como altas, considerando, además, que, para el escenario de

avenidas torrenciales, solo se encuentra 18 empresas con influencia del paso de este tipo de fenómenos.

**UNIVERSIDAD
EAFIT®**

Vigilada Mineducación



 **Futuro
sostenible**