



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS NATURALES
YACIMIENTOS

**“LÓGICA DIFUSA PARA LA CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE SITIO PARA
FUNGIR COMO ALMACÉN DE CO₂”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JOSÉ HENRIQUE MARTÍNEZ MENESES

TUTORA

DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM

CDMX. , SEPTIEMBRE, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Moisés Dávila Serrano.
Secretario: M.C. David Escobedo Zenil.
1 er. Vocal: Dra. Silvia Raquel García Benítez.
2 do. Vocal: Dr. Néstor Martínez Romero.
3 er. Vocal: Dra. Ana Paulina Gómora Figueroa.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería.
Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

TUTOR DE TESIS:

Dra. Silvia Raquel García Benítez.



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Silvia Raquel García Benítez mi total gratitud por su compromiso, paciencia, esmero e interés en la realización y culminación de este trabajo. Mi gran admiración por su profesionalismo, disciplina y calidad humana. Muchas gracias por compartir sus conocimientos y también por mostrarme la necesidad de interesarse en el bienestar de todo ser.

A mi madre por ser siempre mi apoyo y mi refugio. Mi admiración por enseñarme que por más grandes que sean las adversidades es posible cumplir sueños y metas. Siempre agradeceré al destino la oportunidad de tenerte como mamá.

A mi abuela, por brindarme siempre cariño desinteresado y por darme el ejemplo de que ni las peores tormentas pueden socavar tus objetivos.

A mis tíos: Javier, Irma, Matilde, (†) Pablo, Aurora, David, Felicitas y Armando que nunca dejan o dejaron de interesarse en mi bienestar, darme buenos consejos y siempre augurarme éxitos.

A mis amigos: Daniel, Rocío, Isabel, Andrea, Omar y Tarek por apoyarme de diversas formas en la culminación de este trabajo. Además por ser aquellos que en todo momento me han demostrado su lealtad, respeto, cariño y fraternidad.

A mis sinodales: Dra. Paulina Gómora Figueroa, Dr. Moisés Dávila Serrano, M.C David Escobedo Zenil y al Dr. Néstor Martínez Romero, por su disposición y por darse el tiempo de revisar y aportar ideas para la mejora de este trabajo.

ÍNDICE

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Introducción	1
Capítulo I <i>Captura y Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono.</i>	4
I.1 ¿Por qué el interés?	4
I.2 Procesos que componen el CCS	10
1.2.1 Captura	10
1.2.2. Transporte	13
1.2.3. Almacenamiento	14
I.3 Aspectos por considerar para la selección de un medio geológico a escala de cuenca sedimentaria.	30
I.3.1 Conexión entre las fuentes de emisión y los emplazamientos para el almacenamiento	30
I.3.2. Contexto geodinámico	32
I.3.3. Fracturación y Sismicidad.	33
I.3.4. Existencia de formaciones almacén y sello	35
I.3.5. Litologías favorables.	37
I.3.6. Régimen geotérmico y de presión	39
I.3.7. Régimen hidrodinámico	42
I.3.8. Factores hidrogeoquímicos.	45
I.3.9. Factores legales, sociales, medio ambientales y de seguridad	46

Capítulo II : <i>Lógica Difusa</i>	49
II.1 Definición y origen de la Lógica Difusa	49
II.2 Conjuntos Difusos	52
II.2.1 Operaciones con Conjuntos Difusos.	62
II.3 Controlador Difuso	66
II.3.1 Fuzzificación	70
II.3.2 Inferencia	71
II.3.3 Defuzzificación	74
Capítulo III: <i>Sistema Difuso para la Calificación de Sitio</i>	82
III.1 Estado de la emisión.....	83
III.1.1 Tamaño	83
III.1.2 Fuerza Laboral	85
III.1.3 Giro	86
III.1.4 Salida, Estado de la Emisión.....	88
III.2 Disponibilidad.	97
III.2.1 Cobertura	98
III.2.2 Infraestructura de CCA.....	99
III.2.3 Comunicación	100
III.2.4 Salida: Disponibilidad	101
III.3 Tectónica	109
III.4 Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello.	114
III.4.1 Calidad de la formación almacén	115
III.4.2 Calidad de la formación sello	123
III.4.3 Configuración geométrica de las formaciones	130
III.4.4 Salida: Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello	137

III.5 Cualidades geotérmicas y de presión (Calidad de la fase).....	156
III.5.1 Profundidad.....	158
III.5.2 Temperatura.....	158
III.5.3 Presión.....	159
III.5.4 Salida: Cualidades geotérmicas y de presión.....	160
III.6 Régimen Hidrodinámico.....	169
III.7 Factores hidrogeoquímicos.....	173
III.8 Salida: Susceptibilidad.....	178
III.9 Ejercicio de aplicación.....	187
Capítulo IV: Conclusiones.....	227
Referencias.....	228

Índice de figuras

Figura I. 1 Principales gases de efecto invernadero y su aporte (%) a las emisiones totales a la atmósfera por fuentes antropogénicas (modificado de IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014).	7
Figura I. 2. Gráfico de emisión de dióxido de carbono por año con eventos históricos para contextualizar (modificada de IEA, 2020).	8
Figura I. 3. Propuestas tecnológicas de la IEA para la reducción de emisiones (modificada de Cao et al, 2020).	9
Figura I. 4. Diagrama de los procesos de captura de CO ₂ (Sumida et al, 2012).	12
Figura I. 5. Red Nacional de gasoductos (algunos de los cuales, bajo algunas consideraciones podrían ser adaptados para transporte de CO ₂). Hasta 2019 se tenía proyectada una red de casi 19000 km de tuberías considerando gasoductos en operación, concluidos y en construcción. (DGGNP, 2019).	14
Figura I. 6. Gráfico de seguridad de almacenamiento y contribución por tipo de atrapamiento. (Modificado de IPCC, 2005).	15
Figura I. 7. (A) Esquema de una trampa mixta (falla y discordancia) (B) Esquema de una trampa estructural (falla geológica normal) (modificado de Ruiz, 2014).	16
Figura I. 8. Comportamiento normal del atrapamiento residual de CO ₂ (modificado de Ruiz, 2014).	18
Figura I. 9. Esquema general de las diversas formas para el almacenamiento geológico de CO ₂ (tomado de Sandoval, 2019).	20
Figura I. 10. Esquema de un domo salino, se ha identificado que los domos de sal funcionan como trampas estructurales en sistemas petroleros. (Modificado de Baños & Sánchez, 2009).	21
Figura I. 11. Esquema general del proceso de ECBM (modificado de Wang et al, 2018)	23
Figura I. 12. Esquema del proceso de inyección en la formación Utsira en Sleipner, proyecto punta de lanza en el almacén geológico de CO ₂ (modificado de Ghaderi & Landro, 2009).	25

Figura I. 13. Proceso de EOR con Dióxido de Carbono (modificado de Nekabari, 2016).	27
Figura I. 14. Esquema general del ciclo de vida de un yacimiento de hidrocarburos, donde la etapa de abandono indica el agotamiento del yacimiento (modificado de Velasco, 2017).	28
Figura I. 15. Principales industrias con aportes a la emisión de CO ₂ (%) de fuentes antropogénicas y estacionarias en 2005 (modificado de Gale et al, 2005).	31
Figura I. 16. Esquema de las cuencas sedimentarias asociadas a un margen continental convergente (modificada de Einsele, 1992).	33
Figura I. 17. Límites de placas tectónicas (A) divergente, (B) convergente por subducción, (C) convergente por colisión y (D) transformante (modificada de Wiley, 1999).	34
Figura I. 18. Esquema de la permeabilidad y la porosidad de una roca almacén, características necesarias para el almacén de CO ₂ (modificada de Andersen & Kleim, 2014).	36
Figura I. 19. Diagrama de fase del Dióxido de Carbono (modificada de Bachu, 2000).	41
Figura I. 20. Aumento de la efectividad del almacenamiento con la profundidad (modificada de CONAMA, 2008).	42
Figura I. 21. Representación gráfica del flujo controlado por A) compactación, B) compresión tectónica, C) rebote erosivo y D) topografía (modificada de Bachu, 2000).	43
Figura II. 1. Lofti Asker Zadeh (1921 – 2017) considerado padre de la lógica difusa (tomada de Layos, 2017).	49
Figura II. 2. Tren de la línea Nanboku en Sendai Japón.	50
Figura II. 3. Lógica difusa aplicada en lavadoras.	51
Figura II. 4. Representación grafica de un conjunto booleano (izquierda) y uno difuso (derecha) (tomado de Deroncourt, 2011).	53
Figura II. 5. Elementos de los conjuntos difusos.	54
Figura II. 6. Función de membresía triangular para un conjunto difuso.	57
Figura II. 7 Función de membresía trapezoidal para un conjunto difuso	58
Figura II. 8. Función de membresía gaussiana para un conjunto difuso.	59
Figura II. 9. Función de membresía gaussiana para un conjunto difuso.	60

Figura II. 10 Función de membresía singleton para un conjunto difuso.	61
Figura II. 11. Operadores de Zadeh para A) Unión, B) Intersección y C) Complemento.	63
Figura II. 12. Estructura de un controlador difuso (modificado de Ramírez, 2008).....	66
Figura II. 13. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de fuzzificación (modificado de González, 2011).....	67
Figura II. 14. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de inferencia: Evaluación de reglas (modificado de González, 2011).....	68
Figura II. 15. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de inferencia: Agregación y Defuzzificación (modificado de González, 2011).....	69
Figura II. 16. Ejemplo de fuzzificación.	70
Figura II. 17. Conjunto recortado (superior) y conjunto escalado (inferior).....	72
Figura II. 18. Área por defuzzificar tomada del ejemplo presentado por Samanta (2018).	75
Figura II. 19. Área por defuzzificar del ejemplo tomado de Samanta (2018).....	78
Figura II. 20 Diferentes métodos de defuzzificación (modificado de Diciembre, 2017). 80	
Figura III. 1. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Tamaño</i>	85
Figura III. 2. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Fuerza Laboral</i>	86
Figura III. 3 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Giro</i>	88
Figura III. 4 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Estado de la Emisión</i>	89
Figura III. 5. Fuzzificación de la variable <i>Tamaño</i> (170 hectáreas)	91
Figura III. 6. Fuzzificación de la variable <i>Fuerza Laboral</i> (210 empleados).....	91
Figura III. 7 Fuzzificación de la variable <i>Giro</i> (21 %)	92

Figura III. 8. Proceso de análisis de la regla 77 para el ejemplo del sub sistema difuso.	93
Figura III. 9 Proceso de análisis de la regla 96 para el ejemplo del sub sistema difuso.	94
Figura III. 10 Proceso de agregación.....	95
Figura III. 11. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.	96
Figura III. 12 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Cobertura</i>	98
Figura III. 13 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Infraestructura CCA</i>	99
Figura III. 14 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Comunicación</i>	100
Figura III. 15 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Disponibilidad</i>	101
Figura III. 16. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura</i> (40%)	103
Figura III. 17. Fuzzificación de la variable <i>Infraestructura CCA</i> (20%)	103
Figura III. 18. Fuzzificación de la variable <i>Comunicación</i> (65%)	104
Figura III. 19. Proceso de análisis de la regla 32 para el ejemplo del sub sistema difuso.	105
Figura III. 20. Proceso de análisis de la regla 45 para el ejemplo del sub sistema difuso.	106
Figura III. 21. Proceso de agregación.....	107
Figura III. 22. Defuzzificación mediante el método de centroide.	108
Figura III. 23. Esquema de las principales placas tectónicas (modificada de Bryant et al, 2012).	109
Figura III. 24. Regionalización sísmica de México (tomada de Gutiérrez, et al, 2014)	111
Figura III. 25. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Tectónica</i>	112
Figura III. 26. Regionalización sísmica de México con ayuda para la aproximación de valores necesarios para el sistema difuso (CENAPRED, 2014).....	113

Figura III. 27. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Porosidad representativa de la formación almacén</i>	116
Figura III. 28. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Permeabilidad representativa de la formación almacén</i>	118
Figura III. 29 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Homogeneidad de la formación almacén</i>	120
Figura III. 30 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Calidad de la formación almacén</i>	121
Figura III. 31 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Porosidad representativa de la formación sello</i>	124
Figura III. 32. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Permeabilidad representativa de la formación sello</i>	125
Figura III. 33. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Permeabilidad representativa</i>	127
Figura III. 34. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Calidad de la formación sello</i>	128
Figura III. 35. Ejemplo ilustrativo para el <i>enmallado</i> de la formación almacén	131
Figura III. 36. Ejemplo ilustrativo para el <i>enmallado</i> de la formación sello.	132
Figura III. 37. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Efectividad de la formación sello</i>	133
Figura III. 38. Ejemplo ilustrativo para el <i>enmallado</i> de la variable <i>Cobertura a muro</i>	134
Figura III. 39. Ejemplo de <i>enmallado</i> para la obtención del valor relativo para la variable <i>Continuidad lateral de las formaciones</i>	135

Figura III. 40. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	136
Figura III. 41. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	138
Figura III. 42. Fuzzificación de la variable <i>Porosidad representativa de la formación almacén</i> (20 por ciento).....	141
Figura III. 43. Fuzzificación de la variable <i>Permeabilidad representativa de la formación almacén</i> (120 mD).....	141
Figura III. 44. Fuzzificación de la variable <i>Homogeneidad de la formación almacén</i> (60 por ciento).....	142
Figura III. 45. Proceso de análisis de la regla 77 para el ejemplo del sub sistema difuso.	143
Figura III. 46. Proceso de agregación.....	144
Figura III. 47. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.	145
Figura III. 48. Fuzzificación de la variable <i>Porosidad representativa de la formación sello</i> (6 por ciento).....	146
Figura III. 49. Fuzzificación de la variable <i>Permeabilidad representativa de la formación sello</i> (0.65 mD).....	146
Figura III. 50. Fuzzificación de la variable <i>Homogeneidad de la formación sello</i> (65 por ciento).....	147
Figura III. 51. Proceso de análisis de la regla 9 para el ejemplo del sub sistema difuso.	148
Figura III. 52. Proceso de agregación.....	149
Figura III. 53. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.	150
Figura III. 54. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura a techo</i> (1.25).....	151
Figura III. 55. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura a muro</i> (0.875).....	151
Figura III. 56. Proceso de análisis de la regla 18 para el ejemplo del sub sistema difuso.	152
Figura III. 57. Defuzzificación mediante el método de centroide.	153

Figura III. 58. Proceso de agregación.....	154
Figura III. 59. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.	155
Figura III. 60. Gradientes de presión y temperatura, profundidades estimadas para alcanzar el estado supercrítico (modificado de CIEMAT, 2006).....	157
Figura III. 61. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Profundidad</i>	158
Figura III. 62. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Temperatura</i>	159
Figura III. 63. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Presión</i>	160
Figura III. 64. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Cualidades geotérmicas y de presión</i>	161
Figura III. 65. Fuzzificación de la variable <i>Profundidad</i> (0.9 kilómetros).....	163
Figura III. 66. Fuzzificación de la variable <i>Temperatura</i> (36°C).....	163
Figura III. 67. Fuzzificación de la variable <i>Presión</i> (8.2MPa).....	164
Figura III. 68. Proceso de análisis de la regla 50 para el ejemplo del sub sistema difuso.	165
Figura III. 69. Proceso de análisis de la regla 72 para el ejemplo del sub sistema difuso.	166
Figura III. 70 Proceso de agregación.....	167
Figura III. 71. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.	168
Figura III. 72. Representación esquemática del flujo de fluido impulsado por: A. la compactación, B. la compresión tectónica, C. rebote erosivo y D. por topografía (modificado de Bachu 2000).....	170
Figura III. 73. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística <i>Régimen hidrodinámico</i>	172
Figura III. 74. Posibles vías de escape del CO ₂ en un pozo de inyección. Escapa por el material alterado (c, d, e) o a través de las interfases (a, b, f) (tomada de Galarza, 2013).	175

Figura III. 75. Sistema Global Difuso configurado por 6 variables de entrada y una variable de salida. A su vez se presentan los sub sistemas difusos que permiten determinar a cuatro de las variables de entrada y se hace mención del número de reglas posibles de cada sub sistema y del sistema global	179
Figura III. 76. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida <i>Susceptibilidad</i>	180
Figura III. 77. Esquema que muestra la configuración de la primera variable del sistema difuso global: <i>Estado de la Emisión</i> ; que permite analizar cualitativamente el impacto negativo de las emisiones producidas por la industria fija en un sitio específico.	183
Figura III. 78. Esquema que muestra la configuración de la segunda variable del sistema difuso global: <i>Disponibilidad</i> ; que permite analizar cualitativamente si la infraestructura existente dentro un parque industrial y aquella que conecta hacia el exterior puede utilizarse y/o acondicionarse para el transporte del CO ₂ hasta el sitio de almacén.	183
Figura III. 79. Esquema que muestra la configuración de la cuarta variable del sistema difuso global: <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i> ; analiza cualitativamente si las propiedades de las formaciones geológicas que configuran al sitio almacén candidato permiten almacenar grandes cantidades de CO ₂ y que este pueda estar almacenado sin riesgo de fugas.	184
Figura III. 80. Esquema de sub sistemas anidados que permiten calificar la cuarta variable del sistema difuso global: <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i> , el primer elemento que las califica es la <i>Calidad de la formación almacén</i> (califica el espacio poroso disponible para almacenar), el segundo elemento es la <i>Calidad de la formación sello</i> (califica si la formación sello es útil como barrera impermeable) y el último elemento es la <i>Configuración geométrica de las formaciones</i> (califica si la formación sello es lo suficientemente extensa para cubrir a la formación almacenadora).	185
Figura III. 81. Esquema que muestra la configuración de la quinta variable del sistema difuso global: <i>Cualidades geotérmicas y de presión</i> , que califican cualitativamente si las condiciones de presión, temperatura y por ende profundidad permiten que el CO ₂ pueda inyectarse y almacenarse en fase supercrítica.	186

Figura III. 82. Esquema que muestra la configuración del sistema difuso global. Califica de manera cualitativa la susceptibilidad de un sitio a fungir como almacén geológico de CO ₂	186
Figura III. 83. Fuzzificación de la variable <i>Tamaño</i> (64 hectáreas)	188
Figura III. 84. Fuzzificación de la variable <i>Fuerza laboral</i> (3700 empleados).....	189
Figura III. 85. Fuzzificación de la variable <i>Giro</i> (31.9 por ciento de aporte).....	189
Figura III. 86. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura</i> (30 %)	190
Figura III. 87. Fuzzificación de la variable <i>Infraestructura CCA</i> (10 %)	190
Figura III. 88. Fuzzificación de la variable <i>Comunicación</i> (60 %)	191
Figura III. 89. Fuzzificación de la variable <i>Tectónica</i> (0.05).....	191
Figura III. 90. Fuzzificación de la variable <i>Porosidad representativa de la formación almacén</i> (21 %).....	192
Figura III. 91. Fuzzificación de la variable <i>Permeabilidad representativa de la formación almacén</i> (100 mD).....	192
Figura III. 92. Fuzzificación de la variable <i>Homogeneidad de la formación almacén</i> (75 %).....	193
Figura III. 93. Fuzzificación de la variable <i>Porosidad representativa de la formación sello</i> (5 %).....	193
Figura III. 94. Fuzzificación de la variable <i>Permeabilidad representativa de la formación sello</i> (0.01 mD).....	194
Figura III. 95. Fuzzificación de la variable <i>Homogeneidad de la formación sello</i> (80 %).	194
Figura III. 96. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura a techo</i> (1.25).....	195
Figura III. 97. Fuzzificación de la variable <i>Cobertura a muro</i> (0.70).	195
Figura III. 98. Fuzzificación de la variable <i>Profundidad</i> (1 kilómetro).	196
Figura III. 99. Fuzzificación de la variable <i>Temperatura</i> (115 °C).....	196
Figura III. 100. Fuzzificación de la variable <i>Presión</i> (26.47 MPa).....	197
Figura III. 101. Fuzzificación de la variable <i>Régimen hidrodinámico</i> (0.9).....	197
Figura III. 102. Proceso de análisis de la regla 54 para calificar al <i>Estado de la Emisión</i>	199
Figura III. 103. Proceso de agregación que permite calificar al <i>Estado de la Emisión</i> .200	

Figura III. 104. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Estado de la Emisión</i>	201
Figura III. 105. Proceso de análisis de la regla 32 para calificar la <i>Disponibilidad</i>	202
Figura III. 106. Proceso de agregación que permite calificar la <i>Disponibilidad</i>	203
Figura III. 107. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Disponibilidad</i>	204
Figura III. 108. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar <i>Calidad de la formación almacén</i>	205
Figura III. 109. Proceso de agregación que permite calificar la <i>Calidad de la formación almacén</i>	206
Figura III. 110. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Calidad de la formación almacén</i>	207
Figura III. 111. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar <i>Calidad de la formación sello</i>	208
Figura III. 112. Proceso de agregación que permite calificar la <i>Calidad de la formación sello</i>	209
Figura III. 113. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Calidad de la formación almacén</i>	210
Figura III. 114. Proceso de análisis de la regla 14 para calificar <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	211
Figura III. 115. Proceso de agregación que permite calificar la <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	212
Figura III. 116. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	213
Figura III. 117. Proceso de análisis de la regla 78 para calificar <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	215
Figura III. 118. Proceso de agregación que permite calificar a las <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	216
Figura III. 119. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	217

Figura III. 120. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar <i>Cualidades geotérmicas y de presión</i>	218
Figura III. 121. Proceso de agregación que permite calificar a las <i>Cualidades geotérmicas y de presión</i>	219
Figura III. 122. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	220
Figura III. 123. Proceso de análisis de la regla 519 para calificar <i>Susceptibilidad</i>	222
Figura III. 124. Proceso de análisis de la regla 613 para calificar <i>Susceptibilidad</i>	223
Figura III. 125. Proceso de agregación que permite calificar a las <i>Susceptibilidad</i>	224
Figura III. 126. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable <i>Susceptibilidad</i>	225

Índice de tablas

Tabla II. 1 Operadores para Conjuntos Difusos.....	62
Tabla II. 2 Propiedades de los conjuntos difusos (Parte 1).....	64
Tabla II. 3 Propiedades de los conjuntos difusos (Parte 2).....	65
Tabla II. 4 Tabla de centroides tomada de Rodríguez (2018).....	76
Tabla III. 1. Principales industrias con aportes a la emisión de CO ₂ de fuentes antropogénicas y estacionarias en 2005 (modificado de Gale, et al, 2005).	87
Tabla III. 2. Reglas difusas para el subsistema difuso de la variable lingüística <i>Estado de la Emisión</i>	90
Tabla III. 3. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Disponibilidad</i>	102
Tabla III. 4. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Calidad de la formación almacén</i>	122
Tabla III. 5. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Calidad de la formación sello</i>	129
Tabla III. 6. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	137
Tabla III. 7. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Cualidad específica de las formaciones almacén y sello</i>	139
Tabla III. 8. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Cualidades geotérmicas y de presión</i>	162
Tabla III. 9. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Susceptibilidad</i>	181
Tabla III. 10. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística <i>Susceptibilidad</i>	182
Tabla III. 11. Información requerida para el ejercicio de aplicación.	187
Tabla III. 12. Información necesaria para calificar <i>Cualidades esp de las formaciones</i>	214
Tabla III. 13. Información necesaria para calificar la <i>Susceptibilidad</i>	221

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema difuso que permite evaluar, de manera preliminar, la susceptibilidad de una cuenca sedimentaria a fungir como almacén geológico de CO₂. La valoración se desarrolla sobre parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cuenca. La parametrización es diversa y dinámica con entradas que van desde las geológicas, hidrodinámicas hasta las relacionadas con infraestructura física apta para el transporte y el giro industrial.

La propuesta se oferta como una alternativa para el estudio de sitios desde una perspectiva integral y multiparamétrica. La interpretación de las características que hacen a los mejores candidatos se realiza siguiendo el proceso de razonamiento humano con una profunda comprensión de los cuantificadores de cualidad para las inferencias ligadas al quehacer de geo-científicos e ingenieros involucrados en el tema, siendo la lógica difusa, rama de inteligencia artificial, la técnica que permite cumplir con esta tarea. El sistema difuso que se presenta trabaja la información paramétrica con etiquetas lingüísticas y membresías sostenidas en reportes internacionales, publicaciones sobre el entorno nacional y teoría científica sólida. La capacidad de adaptación de estas herramientas hace que lo aquí propuesto sea fácil y rápidamente adaptado a entornos mucho más diversos o geo-situaciones muy específicas.

Como conclusión se destaca que el aporte de este trabajo es la promoción y desarrollo de proyectos que intenten dar solución o mitigar los efectos nocivos de los gases de efecto invernadero, particularmente el CO₂ el mayor impulsor del calentamiento global, así como presentar las bondades de la lógica difusa en el diseño de sistemas difusos expertos en la toma de decisiones. Además se resalta la importancia de la participación de la comunidad ingenieril en esta afrenta.

Abstract

In this work is presented the design of a fuzzy system that allows to assess, in a preliminary way, the susceptibility of a sedimentary basin to act as a geological CO₂ storage site. The assessment is developed on intrinsic and extrinsic parameters of the basin. The parameterization is diverse and dynamic with inputs ranging from geological and hydrodynamic to those related to physical infrastructure suitable for transport and industrial use.

The proposal is offered as an alternative for the study of sites from a comprehensive and multi-parametric perspective. The interpretation of the characteristics that make the best candidates is carried out following the human thinking process with a deep understanding of the quality quantifiers for the inferences linked to the work of geo-scientists and engineers involved in the subject. The presented fuzzy system deals with parametric information, linguistic labels and memberships supported by international reports, publications on the national environment and solid scientific theory. The advantageous adaptability of these tools makes this proposal be easily and quickly adaptable to much more diverse environments or very specific geo-situations.

As conclusion, it is emphasized that the contribution of this work is to promoting and developing projects which attempt to solve or mitigate the harmful effects of greenhouse gases, particularly CO₂, the main driver of global warming, as well as to present the benefits of fuzzy logic in the design of fuzzy expert systems in decision making. In addition, the importance of the participation of the engineering community in this affront is highlighted.

Introducción

El devastador impacto que el calentamiento global (aumento gradual de la temperatura de la Tierra derivado del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero GEI) tiene sobre los ecosistemas, obliga a la humanidad a trabajar para mitigar el daño al planeta. La deforestación y la quema de combustibles fósiles producto de los procesos de la industria fija (centrales eléctricas, plantas de procesamiento de gas, plantas cementeras, plantas petroquímicas, extracción de hidrocarburos, etc.) representan las actividades humanas más ligadas a la emisión del dióxido de carbono CO₂ (de los GEI, el que más se produce) hacia la atmósfera. Sin embargo la dependencia de las industrias por productos derivados de los combustibles fósiles no permite que la demanda de estos cese en el corto plazo, por lo que resulta imperioso implantar medidas conjuntas como la disminución de uso de combustibles fósiles, uso de energías alternas y el desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico del CO₂.(CCS). Esta última tecnología permite atacar de manera pronta al problema debido a que es posible adaptar y/o utilizar técnicas y tecnologías ya desarrolladas, probadas y mejoradas por la industria petrolera por ejemplo el diseño de pozos de inyección y producción, el diseño de gasoductos y oleoductos, simulación y caracterización de yacimientos así como la administración integral de yacimientos por mencionar algunas (Bachu,2000; CIEMAT,2006; Dávila,2011).

Un proyecto de CCS requiere de un análisis integral y minucioso del sitio seleccionado para tal efecto. En las primeras etapas del diseño de la instalación (entiéndase *instalación* como cualquier objeto que sirva para los fines, sea natural o construido por el hombre) es necesario elegir entre sitios con muy diversas geo-condiciones y niveles de infraestructura. En esta fase, cuya característica primaria es el rastreo en grandes áreas con características “seguras” de acuerdo con el objetivo del proyecto, es fundamental evitar onerosas inversiones en análisis y exámenes detallados que pudieran desalentar a los inversionistas e interesados. Por esta razón, en este trabajo de investigación se presenta el desarrollo de un instrumento que apoya a los involucrados en la toma de decisiones y en la definición de las posteriores campañas de investigación, de forma que éstas sean más eficientes y consoliden proyectos mucho más atractivos.

El objetivo de esta Tesis es presentar un método para construir una herramienta que evalúa la susceptibilidad de un sitio para convertirse en un sitio de almacenamiento geológico de CO₂, con un principal interés en yacimientos exhaustos de hidrocarburos y acuíferos salinos profundos. La propuesta es analizar la mayor cantidad de características posibles, de forma integral, y otorgar una medida (cualitativa) de la susceptibilidad de un sitio a convertirse en un almacén seguro, eficiente y sostenible. Las aristas que se abordan como variables únicas o como submodelos compuestos de grupos de parámetros son:

- Estado (cualitativo) de la emisión de CO₂.
- Disponibilidad de infraestructura para el transporte de gas (gasoductos).
- Ambiente tectónico.
- Calidad de las formaciones a fungir como almacén y sello (al respecto de la roca almacén -formación que actúe como depósito del gas- y la roca sello -formación que actúe como una barrera que impida la migración del CO₂ a superficie garantizando la estanqueidad del dióxido de carbono en el medio).
- Condiciones de presión y temperatura (al respecto de la fase en que se inyectará y almacenará el CO₂ dentro del medio geológico).
- Régimen hidrodinámico.
- Factores hidrogeoquímicos.

Con estas entradas se define la susceptibilidad de un sitio a fungir como almacén (variable de salida) en términos de una categoría (Nula, Moderada y Alta).

La interpretación de las relaciones paramétricas y la emisión de las conclusiones se proponen con LD (Lógica Difusa). Siendo la LD una rama de la IA (Inteligencia Artificial) que, permite expresar matemáticamente la vaguedad y la incertidumbre al ser una lógica multivaluada, y que concluye ante estímulos mimetizando el razonamiento y actuación humanas, se elige como la herramienta que tiene las ventajas más claras para los objetivos de esta investigación. El producto con LD no requiere construcciones

matemáticas complejas, usa y explota las bondades del conocimiento expresado con lenguaje natural y es extremadamente asequible dada su facilidad de configuración. La calificación derivada de este análisis difuso podría complementarse con aspectos económicos, legales, sociales y medioambientales, fundamentando integralmente las decisiones sobre el establecimiento de sitios almacén.

Capítulo I *Captura y Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono.*

I.1 ¿Por qué el interés?

La crecida inquietud internacional sobre los efectos dañinos del cambio climático ha alentado a organizaciones e individuos a ahondar su cognición sobre este fenómeno, con el fin de identificar oportunidades innovadoras que permitan disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de adaptarse a sus impactos. El sector industrial tiene un gran impacto en la evolución de las sociedades y debe responder a esta realidad, volver a examinar su papel en la interrelación con las comunidades y los territorios para un modelo de desarrollo sostenible y un uso efectivo de los recursos. En este sentido, la regulación y la gestión pública no son suficientes y compromisos fuertes del sector privado son necesarios para modificar las formas tradicionales de planificación, diseño, fabricación y venta de servicios y bienes (CIEMAT, 2006, Dávila, 2011).

El impacto económico devenido del cambio climático es grande, y afecta a las distintas etapas de las cadenas de producción: desde variaciones intempestivas en la producción de materias primas, la inclusión de impuestos al carbono hasta afectaciones físicas de líneas de transporte por eventos climáticos externos, encareciendo productos y servicios que para grandes sectores de la humanidad serán inasequibles. Esto plantea un nuevo escenario económico al cual se debe anticipar y adaptar, no solamente para establecer una estrategia sostenible, sino además garantizar el crecimiento y la competitividad de las empresas. Sin embargo, esta situación administrativa-económica no cambiará en el futuro cercano y la situación climática es ya muy preocupante. Por esto, el tema debe ser imperiosamente atendido antes de que las consecuencias sean aún más devastadoras para el ser humano (Dávila, 2011). Para la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el año 2021 representa un año decisivo para enfrentar la emergencia climática global, debido a que es necesario reducir las emisiones mundiales de GEI en 45% para 2030 tomando como referencia el año 2020, con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global en 2°C por año, e idealmente 1.5°C para finales de siglo (ONU, 2021).

El calentamiento global (referido al cambio climático) por definición se entiende como el incremento paulatino de la temperatura de la Tierra ocasionado por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) originadas por las actividades humanas. Las actividades de mayor impacto son la deforestación y la quema de combustibles fósiles producto de los procesos de la industria fija (centrales eléctricas, plantas de procesamiento de gas, plantas cementeras, plantas petroquímicas, etc.). Se distinguen como principales GEI (Benavides et al , 2007; Wallington et al, 2014) (**Figura I. 1**):

- a) Dióxido de carbono (CO_2): que representa el 76% de las emisiones globales (el de mayor aporte). Una vez se emite en la atmósfera, un 40% permanece retenido por 100 años, 20% después por 1000 años y un 10% después de 10000 años. Este gas es emitido principalmente de las actividades humanas que dependen de la quema de combustibles fósiles, así como una serie de desarrollos industriales como la obtención del cemento y la deforestación de bosques para la obtención de leña para, entre otros.
- b) Metano (CH_4): representa aproximadamente el 16% de las emisiones globales, su tiempo de retención en la atmósfera es similar al que presenta el CO_2 , este gas posee un potencial de calentamiento global de 25 veces más que el del CO_2 . La producción y distribución de gas natural y petróleo y la explotación mineral, así como descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos (disposición de residuos sólidos, actividades agrícolas y el tratamiento de aguas residuales son los sitios emisores más importantes de este gas.
- c) Óxido nitroso (N_2O): es un gas de efecto invernadero con la capacidad de ser al menos 300 veces más poderoso que el del CO_2 en términos de potencial de calentamiento global. Este perdura en la atmósfera al menos un siglo. Representa alrededor del 6% de las emisiones globales. El óxido nitroso se emite principalmente por el uso de la tierra con fines agrícolas y en menor proporción por la generación de energía con base en la quema de combustibles fósiles así como por la desintegración de proteínas de aguas residuales domesticas.

- d) Gases fluorados: son los gases de efecto invernadero más potentes y sintéticos, se emiten en múltiples procesos industriales, estos gases engloban los hidrofluorocarbonos, el trifluoruro de nitrógeno, el hexafluoruro de azufre y los perfluorocarbonos. A pesar de que estos gases se emiten en mucho menor proporción en comparación con otros GEI, estos atrapan una mayor cantidad de calor. De hecho, el potencial de calentamiento global para estos gases puede ser del orden de miles o decenas de miles, y tienen tiempos de vida en la atmósfera muy grandes en algunos casos hasta miles de años. Representan solo el 2% de las emisiones globales.
- e) Ozono (O_3): en contraste con todos los demás gases de efecto invernadero, el ozono no se emite a la atmósfera. El ozono se genera *in situ* en la atmósfera mediante dos procesos: (i) fotólisis de oxígeno molecular (O_2) mediante la cual genera átomos de oxígeno (O), átomos que se agregan al oxígeno molecular generando de esta forma ozono (O_3); el segundo método (ii) es la oxidación de componentes (de fuentes naturales y antropogénicas) en la presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x). El primer proceso se genera en la atmósfera superior donde la longitud de onda es lo suficientemente corta para fotodisociar oxígeno molecular y este proceso se da lugar en la capa de ozono estratosférica a altitudes de entre 20 a 50 km. El segundo proceso ocurre a través de la atmósfera pero, debido a la mayor disponibilidad de componentes orgánicos y NO_x cerca de la superficie terrestre, este efecto es más importante en la atmósfera inferior (troposfera). La emisión de grandes cantidades de componentes orgánicos y NO_x en áreas urbanas lleva a la formación de cantidades considerables de ozono en grandes metrópolis alrededor del mundo. El tiempo de vida del ozono en la atmósfera es del orden de días o semanas dependiendo de las condiciones locales. Las concentraciones de ozono en la atmósfera inferior son típicamente 10 a 100 partes por billón (ppb).

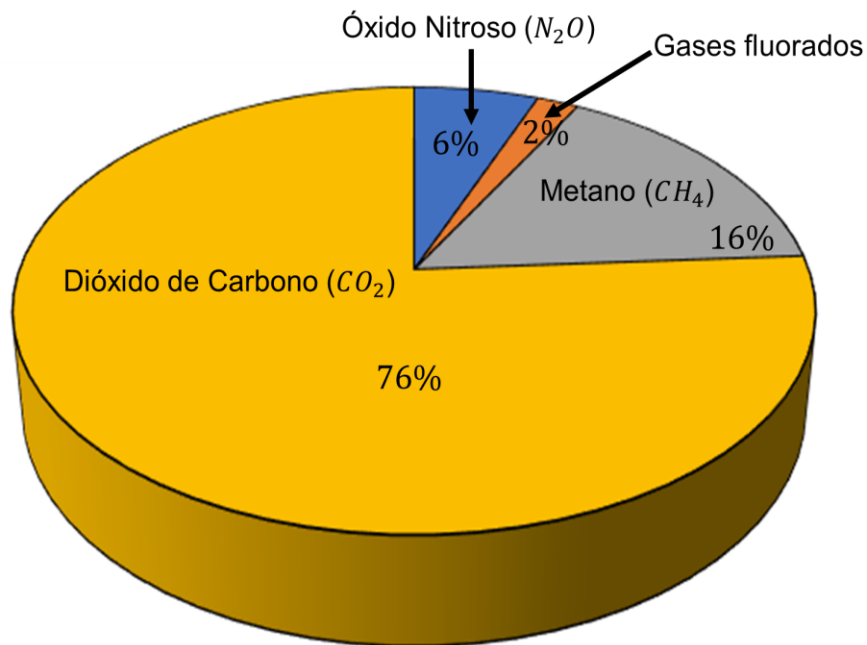


Figura I. 1 Principales gases de efecto invernadero y su aporte (%) a las emisiones totales a la atmósfera por fuentes antropogénicas (modificado de IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014).

El reporte de la International Energy Agency (IEA, 2020), proyectó que para 2020 las emisiones de CO_2 alcanzó las 30.6 Gt, lo cual representó un descenso del 2.4% respecto a lo registrado en 2019. Sin embargo, el panorama no es alentador pues esto se asocia al impacto de la crisis sanitaria mundial (por COVID-19) y todo parece indicar que la rama creciente retome fuerza en los próximos años (**Figura I. 2**)

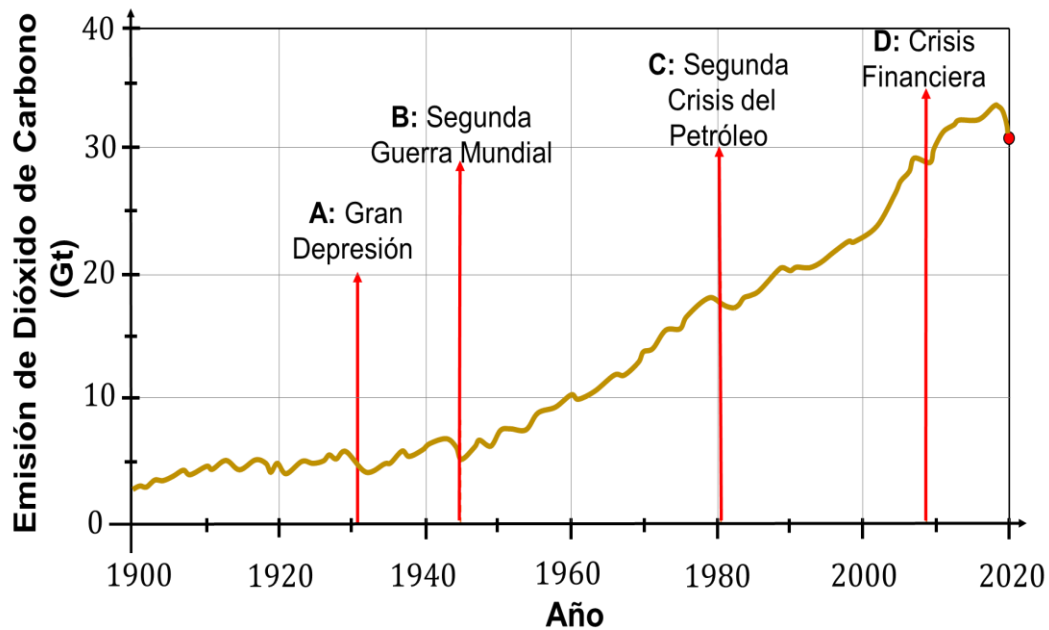


Figura I. 2. Gráfico de emisión de dióxido de carbono por año con eventos históricos para contextualizar (modificada de IEA, 2020).

La industria y las actividades humanas relacionadas no cambiarán de un día para otro, la necesidad de buscar opciones para mitigar el efecto de las emisiones de GEI resulta urgente. La AIE (Agencia Internacional de Energía) ha enlistado una serie de tecnologías que contribuyen a la reducción de estas emisiones (**Figura I. 3**):

- Captura y Almacenamiento de Dióxido de Carbono (CCS por sus siglas en inglés *Carbon Capture and Storage*).
- Energías renovables.
- Energía nuclear.
- Eficiencia en la generación de energía.
- Sustitución de combustibles fósiles.
- Eficiencia en el uso de la electricidad.

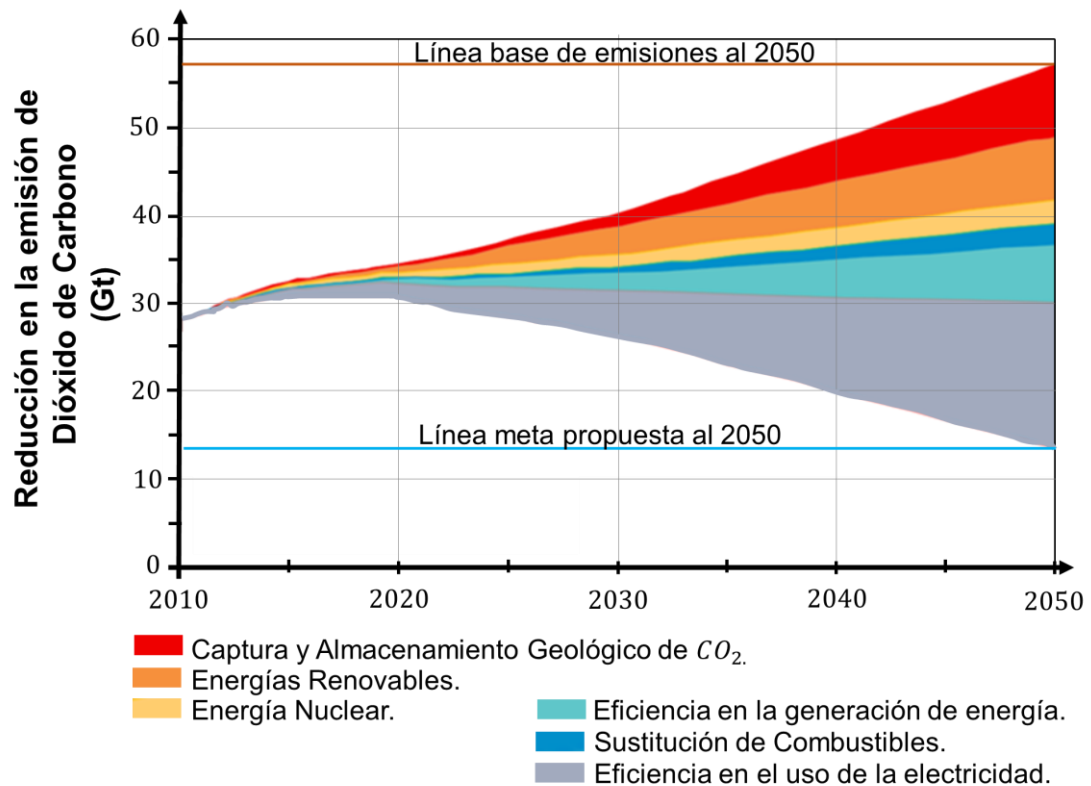


Figura I. 3. Propuestas tecnológicas de la IEA para la reducción de emisiones (modificada de Cao et al, 2020).

La AIE proyecta que de aplicarse en su conjunto las tecnologías propuestas, en el año 2050 la emisión total de CO_2 podría ser inferior a 15 Gt, caso contrario (dejando que las cosas sigan el curso hasta hoy registrado, observe que en el 2019 se alcanzaron 33 Gt) para ese mismo año las emisiones superarían las 55 Gt y habrían consolidado su nocivo e irreversible impacto en la vida del planeta (Dávila, 2011; AIE, 2020).

Entre las opciones, la Captura y Almacenamiento de CO_2 significa el mayor impacto favorable (reducción más importante). Esto se suma al entorno tecnológico *listo para usar* por los desarrollos de la industria petrolera. Además el CCS es entonces la única solución que puede verdaderamente mitigar el efecto climático y proveer una producción de energía que permita la explotación de recursos naturales y renovables (Bachu, 2000; Global CCS Institute, 2019).

I.2 Procesos que componen el CCS

El almacenamiento de CO₂ en un medio geológico representa una de las soluciones a la mitigación de emisiones nocivas al ambiente. El objetivo de esta tecnología es capturar el gas (desde grandes fuentes emisoras), transportarlo al sitio de almacenamiento geológico (lugar que debe de cumplir varios criterios para que sea considerado *almacén*) y asegurar su adecuado confinamiento (en un sistema que evite la fuga del gas). El potencial de la técnica se verifica a mediano plazo especialmente en regiones ricas en hidrocarburos y cuenta con dos ventajas: (i) la aceptación pública y (ii) la madurez tecnológica (IPCC, 2005).

A continuación se describen los 3 procesos principales del CCS: captura, transporte y almacenamiento con base en la descripción de Herzog (2009).

1.2.1 Captura

El objetivo de esta etapa consiste en establecer a condiciones de alta presión un caudal concentrado de CO₂, de tal forma que el transporte al sitio de almacenamiento sea fácil. Resulta posible transportar e inyectar bajo tierra el flujo de gas en concentraciones bajas de CO₂, sin embargo resulta poco práctico debido a los altos costos de la energía y otros gastos conexos. Por ende, establecer un caudal de CO₂ en condiciones de alta pureza es sumamente importante tanto para su almacenamiento como para su transporte. La separación del CO₂ de una mezcla de gases es una actividad comercial actual que se realiza principalmente en plantas de generación de hidrógeno, amoníaco y de purificación de gas natural. Típicamente el CO₂ se emite a la atmósfera, en muy pocas ocasiones el CO₂ se utiliza con fines comerciales o de almacenamiento. Los usos principales que se le da a este CO₂ son para la recuperación mejorada de aceite y para la industria de la comida. (Wilcox, 2012; Galarza, 2013).

Se han documentado tres sistemas principales de captación de CO₂ cuyo origen es la quema de biomasa, combustibles fósiles o un agregado de estos combustibles, el uso de uno u otro depende del proceso industrial que se trate, estos sistema son:

- a) Sistemas de captación *posterior a la combustión (post-combustión)*: estos sistemas el CO₂ se separa una vez se ha producido la combustión en el aire del

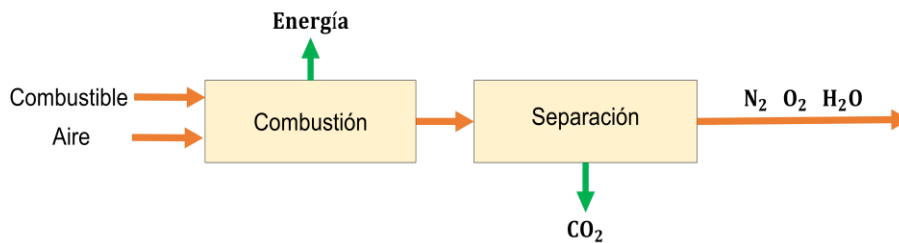
combustible. Usualmente, estos sistemas captan la pequeña fracción de CO_2 (la cual oscila entre el 3 al 15 por ciento del volumen) mediante la aplicación de un solvente líquido que forma parte del caudal de gas de combustión teniendo al nitrógeno como componente principal. Por lo general, el solvente ocupado es la monoetanolamina (MEA) (Herzog, 2009).

- b) Sistema de captación *previa a la combustión (pre-combustión)*: estos sistemas se consideran los más favorables para la separación del CO_2 , debido a la gran concentración de CO_2 producido por un reactor de conversión (generalmente entre el 15 al 60 por ciento del volumen) sometido a una presión alta que caracteriza a estas aplicaciones. Un par de aspectos que deben considerarse son la complejidad y los costos onerosos de las etapas tempranas. Estos sistemas siguen el siguiente proceso, de principio en un reactor con vapor más aire u oxígeno se procesa el combustible primario para generar una mezcla compuesta principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno (“gas de síntesis”). Posteriormente en un segundo reactor el monóxido de carbono con vapor generara hidrógeno adicional y CO_2 . De esta mezcla se pueden separar dos flujos uno de CO_2 y otro de hidrógeno. De esta forma el CO_2 puede ser almacenado mientras que el hidrógeno tiene las características adecuadas para la generación de energía eléctrica y/o calor al ser un producto energético que además es libre de carbono (Ramírez, 2011).
- c) Sistema de *combustión de oxígeno-gas (oxi-combustión)*: estos sistemas se caracterizan por sustituir el aire por oxígeno en el proceso de la combustión del combustible primario del cual se obtiene como producto un gas de combustión que tiene dos componentes principales: CO_2 y vapor de agua (donde el CO_2 representa más de cuatro quintas partes del volumen total). Posteriormente se sustrae mediante enfriamiento y compresión del flujo de gas, el vapor de agua. Para este proceso es necesario extraer el oxígeno del aire buscando obtener un nivel de pureza que oscila entre el 95 y 99 por ciento del oxígeno. Es necesario un tratamiento posterior del gas de combustión para poder extraer los contaminantes

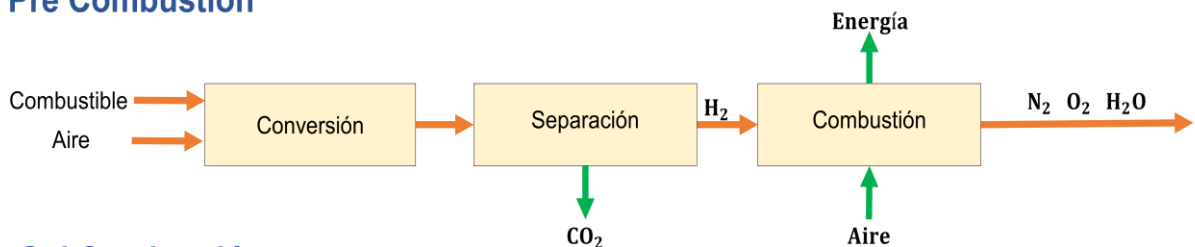
atmosféricos y los gases no condensados (como el nitrógeno) del gas de combustión previo al transporte del CO_2 al sitio de almacén (IPCC, 2005).

Todos estos procesos requieren de separar del flujo de gas diversos contaminantes, principalmente O_2 , H_2 y CO_2 (**Figura I. 4**). Esta separación se consigue por diversos medios, ya sea por separación criogénica, membranas, por disolventes, etc. La determinación sobre cuál tecnología de captación debe implementarse se realizará con base en las características del proceso en que deba aplicarse. Uno de los sitios en donde los sistemas de pre combustión y post combustión tienen un potencial de captura son las centrales eléctricas donde se estima que la captación podría ser de entre el 85 al 95 por ciento del CO_2 producido. Importante mencionar que al momento de instalar sistemas de captura y compresión se observara un aumento en la demanda de energía, entre el 10 y el 40 por ciento dependiendo del tipo de sistema. (Herzog, 2009).

Post Combustión



Pre Combustión



Oxi Combustión

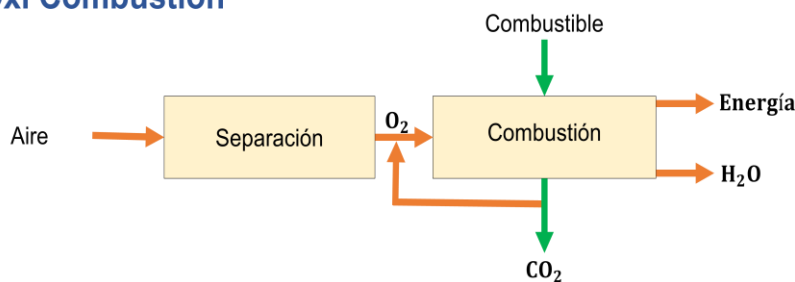


Figura I. 4. Diagrama de los procesos de captura de CO_2 (Sumida et al, 2012).

1.2.2. Transporte

La segunda etapa consiste en transportar el CO_2 capturado hasta el sitio de almacenamiento (CCS) o para su utilización industrial. En la actualidad el medio más común para el transporte de gas natural y de CO_2 son los gasoductos, una tecnología de mercados maduros (**Figura I. 5**). Para facilitar y abaratar el transporte del CO_2 , este se somete a compresión por encima de los 8 MPa, condición que busca incrementar la densidad del CO_2 y prevenir la formación de un régimen de flujo de dos fases. Existen alternativas para el transporte del CO_2 , en su estado líquido este puede transportarse en buques, camiones o vagones cisterna con la característica de ser isotérmicas a una presión muy inferior al ambiente y una temperatura a condiciones inferiores a la del ambiente. El transporte involucra cualquier proceso que vincule a la fuente de emisión de CO_2 con el sitio de almacenamiento. Se debe aclarar que las técnicas o métodos que se utilicen dependen fundamentalmente de las regulaciones de cada país. (IPCC, 2006).

Cuando el CO_2 transita por largas distancias o ultramar para su depósito final, desde el punto de vista económico el medio más adecuado para su transporte son los buques cisterna. Los buques han probado su capacidad de transportar propano y butano de manera eficiente por ello se indica como una de las formas adecuadas para el transporte del CO_2 . (a una presión aproximadamente de entre 1.4 a 1.7 MPa). En la actualidad este medio de transporte se lleva a cabo a pequeña escala remarcando que, hoy en día el medio más común para el transporte de CO_2 son los gasoductos (Herzog, 2009).

Las opciones de transporte tienen un costo asociado; siendo la distancia y la cantidad de gas transportado los factores medulares que indican los costos. De manera particular los gasoductos sufrirán un aumento de costos si cruzan zonas de fuerte densidad de población, montañas, ríos o si son submarinos; así como factores de fabricación como las fluctuaciones del precio del acero. A partir de la documentación sobre múltiples proyectos de CCS realizados en tierra, se tiene un estimado de entre 4 hasta los 45 dólares por cada tonelada de CO_2 transportada y almacenada. (IPCC, 2005; Smith, 2021).

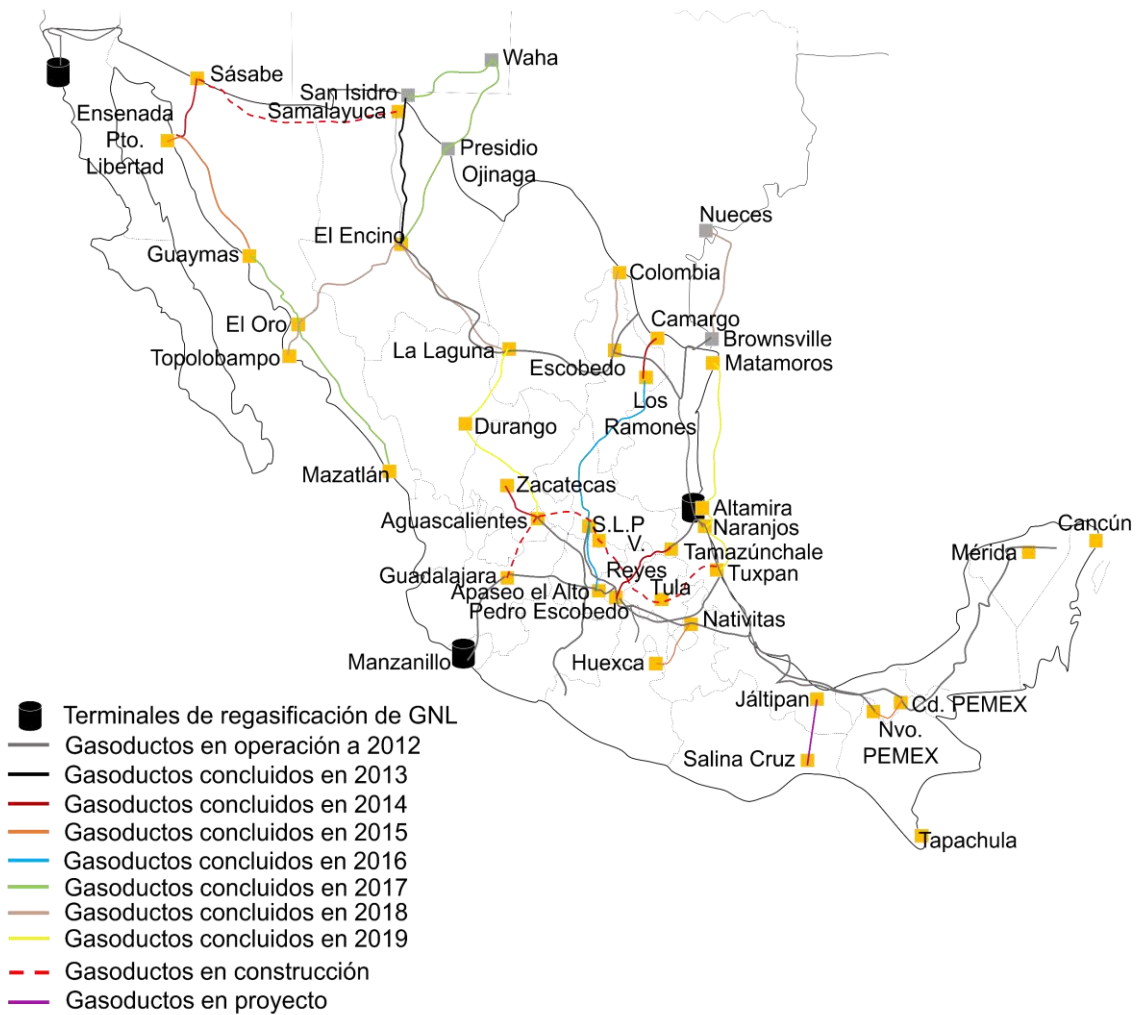


Figura I. 5. Red Nacional de gasoductos (algunos de los cuales, bajo algunas consideraciones podrían ser adaptados para transporte de CO_2). Hasta 2019 se tenía proyectada una red de casi 19000 km de tuberías considerando gasoductos en operación, concluidos y en construcción. (DGGNP, 2019).

I.2.3. Almacenamiento

El almacenamiento geológico de CO_2 es la etapa en la cual se inyecta el CO_2 en estado supercrítico en formaciones geológicas profundas (que contengan cierta porosidad y permeabilidad) para servir como almacén. Estas formaciones deben estar acompañadas por capas de roca impermeable o algún otro mecanismo estratigráfico o estructural que actúen como sello (Ruíz, 2011).

Destacar que en todas las formaciones geológicas se presentan mecanismos de atrapamiento que contribuyen para garantizar que el CO_2 almacenado sea retenido en el medio por períodos de tiempo suficientemente largos e impidiendo la fuga del CO_2 a superficie. Existen dos tipos de mecanismos de atrapamiento: los mecanismos de retención que están basados en procesos físicos (atrapamiento estructural o estratigráfico, hidrodinámico, residual) y los mecanismos que confinan el CO_2 por procesos químicos (atrapamiento por solubilidad y mineral). El almacenamiento geológico de CO_2 tiene alta dependencia de la combinación física y geoquímica de los mecanismos de captura, que determinaran su efectividad. Los sitios de almacenamiento más eficaces son aquellos en donde el CO_2 queda inmóvil. Nótese que según transcurre el tiempo los mecanismos de retención ofrecen mayor seguridad (**Figura I. 6**) (Pérez et al, 2009; Mota, 2013; Sandoval, 2019).

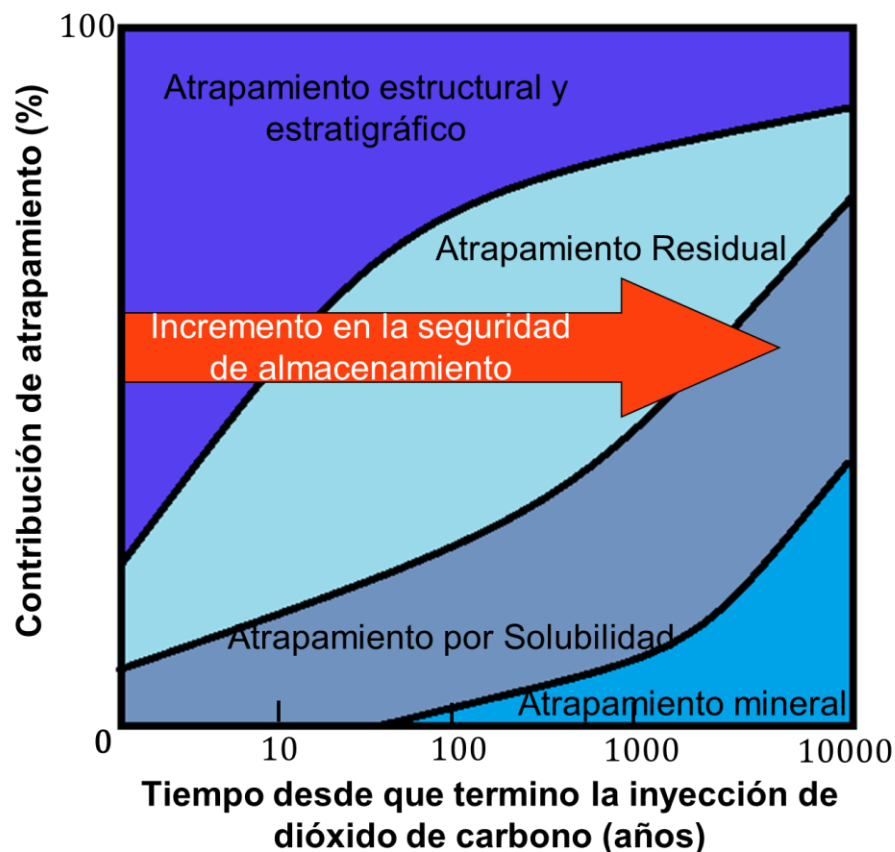


Figura I. 6. Gráfico de seguridad de almacenamiento y contribución por tipo de atrapamiento. (Modificado de IPCC, 2005).

De forma detallada los mecanismos de atrapamiento son:

A) Atrapamiento estratigráfico/estructural

Este mecanismo de atrapamiento retiene el CO₂ mediante una roca de baja permeabilidad y porosidad. La disposición de la roca sello forma trampas estructurales o estratigráficas que sirven de tope para evitar la fuga del CO₂ a superficie (de la misma forma que actúan en los yacimientos de hidrocarburos). Se identifican a los bloques de falla basculados o pliegues como las trampas estructurales más típicas (**Figura I. 7 A**). Las trampas estratigráficas se producen por acuñaamiento sedimentológico o por cambios de facie laterales. También es posible encontrar trampas mixtas (**Figura I. 7 B**) (Ruíz, 2014).

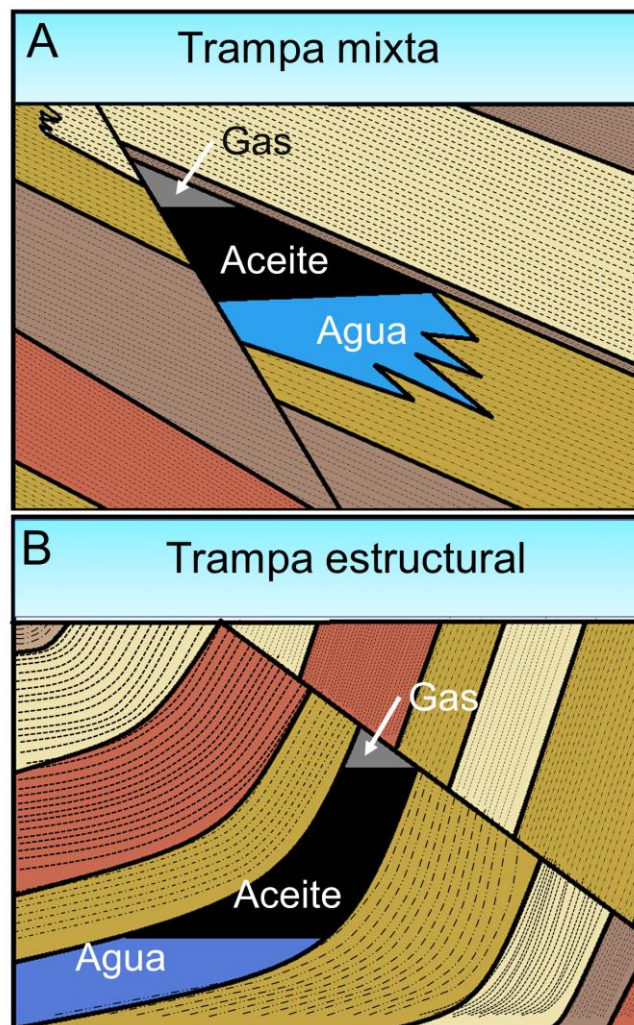


Figura I. 7. (A) Esquema de una trampa mixta (falla y discordancia) (B) Esquema de una trampa estructural (falla geológica normal) (modificado de Ruiz, 2014).

B) Atrapamiento hidrodinámico

Este mecanismo de atrapamiento se presenta cuando el CO_2 (ya sea en fase inmisible o miscible) queda retenido debido al flujo hidrogeológico que se presenta de manera natural en los acuíferos salinos regionales, los tiempos de residencia que se presentan son significativos, con duraciones desde los miles hasta los millones de años. La dirección del flujo y la velocidad del agua de formación así como el buzamiento de la formación sello son los factores que inciden directamente en el flujo de CO_2 atrapado por el flujo de agua. Serán factores favorables para retener una mayor cantidad de CO_2 , que la vía de migración tenga una longitud muy grande y que la velocidad de transporte sea lenta, estos aspectos permiten que el CO_2 se quede retenido residualmente o se disuelva hasta desaparecer como fase libre del sistema. Generalmente los acuíferos salinos presentan una velocidad de flujo muy reducida (del orden de decenas de centímetros por año), que origina que el tiempo de residencia sea de millones de años. A diferencia del atrapamiento estratigráfico/estructural, para este mecanismo la existencia de trampas geológicas no es requerido (IPCC, 2005; Pérez et al, 2009).

C) Atrapamiento residual

Cuando el CO_2 por acción de las fuerzas de capilaridad queda inmóvil dentro de los poros de la roca se está presentando atrapamiento residual. Una vez se concluye la inyección, este mecanismo se hace presente en el almacén y es capaz de inmovilizar cantidades importantes de este gas (20-25 %) dependiendo del tipo de formación (Ruíz, 2014). Durante el proceso de inyección de CO_2 en el medio almacenador, el empuje del CO_2 sobre el fluido de la formación dominará el desarrollo de la pluma. Se ha identificado que en la parte delantera de la pluma se encuentran permeabilidades relativas al CO_2 altas debido a que el fluido de formación es desplazado por el empuje del CO_2 ascendente mientras que, en la parte trasera, será la absorción de agua (imbibición) el fenómeno que domina inundando por detrás de la pluma que migra. Cuando la concentración de CO_2 decae debajo de cierto nivel durante el proceso de imbibición, una porción del CO_2 queda retenido de manera efectiva en los poros por las fuerzas de capilaridad como fase residual inmóvil, fase que puede irse disolviendo en el agua con el tiempo (**Figura I. 8**) (Kadli & Gibson Poole, 2008).

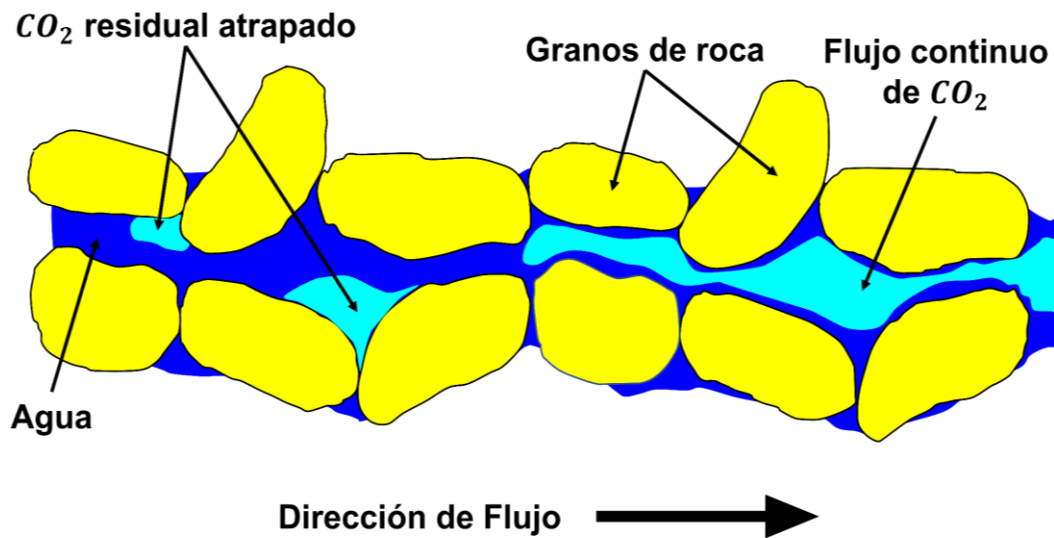


Figura I. 8. Comportamiento normal del atrapamiento residual de CO₂ (modificado de Ruiz, 2014).

D) Atrapamiento por solubilidad

Cuando el Dióxido de Carbono se disuelve en el agua de formación se está presentando el atrapamiento por solubilidad. Ante un aumento de salinidad y temperatura del agua de formación la solubilidad del CO₂ disminuye y si la presión aumenta, la solubilidad aumenta. Mediante procesos de difusión, dispersión y convección, el CO₂ tiene la capacidad de mezclarse y posteriormente disolverse en el agua. La ocurrencia de fenómenos convectivos que dominarán sobre la difusión aumentarán a medida que se produce la disolución en el agua; en consecuencia se presentará el incremento de su densidad al saturarse con CO₂ lo cual originará que este gas se desplace a niveles inferiores del almacén, dependiendo de la heterogeneidad existente (Bachu & Carroll, 2004). A escalas de tiempo suficientemente extensas este mecanismo dominará cualquier tipo de formación (cientos, miles de años) (Ruíz, 2014).

E) Atrapamiento mineral

Las reacciones químicas provocadas por la interacción del CO_2 con fluidos mineralizados ricos en cationes divalentes como Ca, Mg u otros o con las fases minerales reactivas presentes en la formación o con permite la precipitación de nuevos minerales carbonatados, este proceso es el atrapamiento mineral. Los elementos que repercuten en este tipo de atrapamiento son la temperatura y presión existentes y la mineralogía de la roca almacén. Las reacciones químicas consideran para su generación el flujo a través de la roca y de la superficie de contacto entre los granos minerales y el agua que contiene CO_2 disuelto. Este atrapamiento requiere del paso del tiempo para que se presente (centenas de años), generalmente lenta y en función de la cinética de las reacciones (Flett et al, 2004).

F) Atrapamiento por adsorción

Cuando las formaciones compuestas por pizarras ricas en materia orgánica o vetas de carbón adsorben el CO_2 , se esta presentando el atrapamiento por adsorción. Como se ha mencionado previamente, el carbón posee una afinidad de al menos dos veces más por el CO_2 en comparación con el CH_4 , compuesto que se encuentra naturalmente en los estratos de carbón. El atrapamiento por adsorción depende del contenido mineral del carbón, del rango, los macérales y las condiciones de temperatura y presión. (Ruiz, 2014).

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005) ha identificado cuatro tipos de medios geológicos con alto potencial para almacenar CO_2 , los cuales serán descritos a detalle a continuación (**Figura I. 9**).

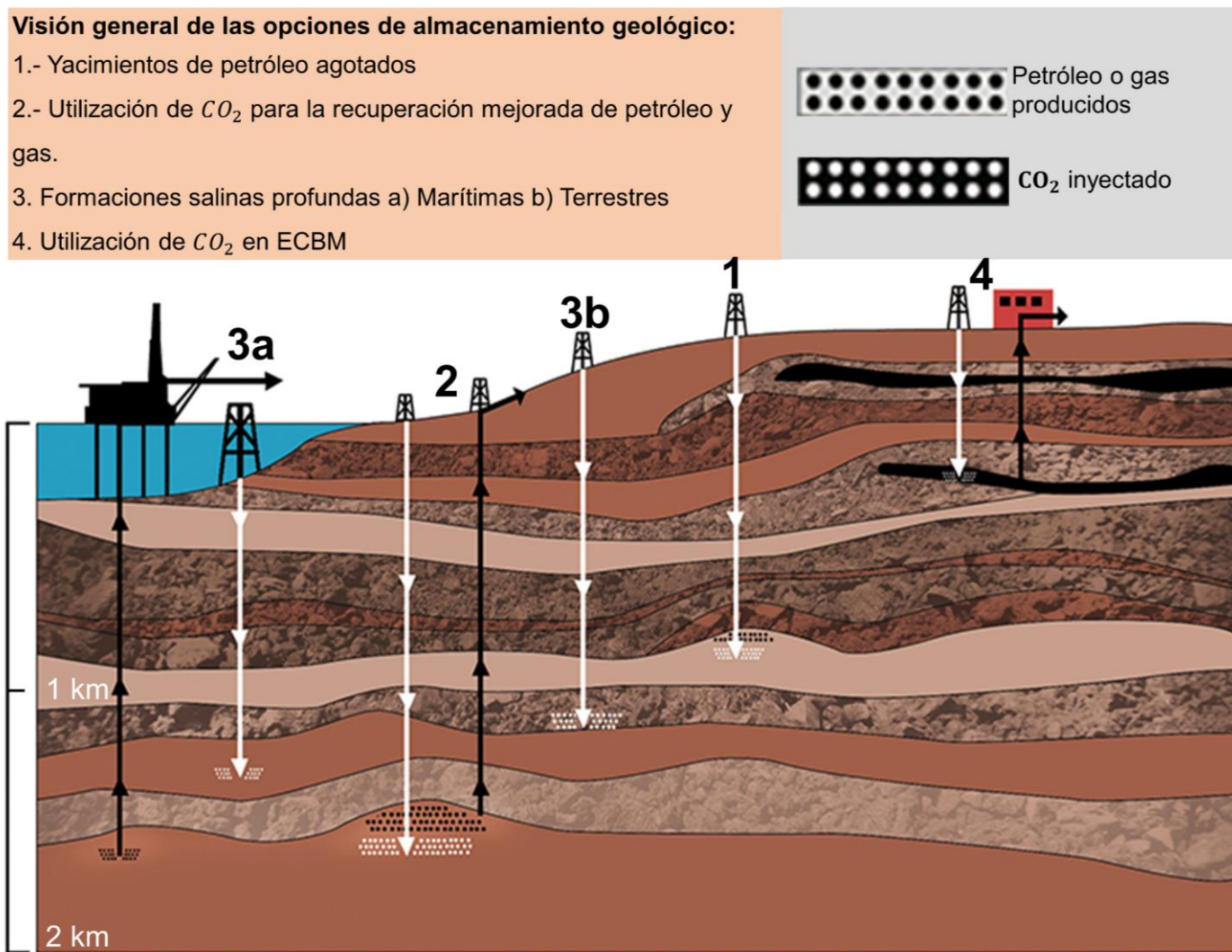


Figura I. 9. Esquema general de las diversas formas para el almacenamiento geológico de CO_2 (tomado de Sandoval, 2019).

A) Formaciones salinas y cavernas en evaporitas.

Es una opción que puede proporcionar una solución a largo plazo para el almacenamiento de CO₂ en un medio geológico. Existe tecnología desarrollada y aplicada para el almacenamiento de petróleo, gas natural, aire comprimido y explotación de gas que se considera puede utilizarse para poder almacenar el CO₂ en este tipo de medio geológico. Estas formaciones están compuestas por rocas sedimentarias porosas y permeables que contienen fluidos salinos en su espacio poroso, para fungir como almacén deben estar estructuralmente aisladas y a profundidades mayores que las formaciones que contienen agua dulce destinadas al consumo humano (Bachu, 2000 & Galarza, 2012)

Este medio geológico requiere para su utilización, de excavar la roca (mediante disolución), generalmente halita (sal), de tal forma que permita configurar una cavidad que pueda ser rellena por CO₂. Es una alternativa favorable debido a que las rocas salinas exhiben propiedades de auto-sellado y una escasa permeabilidad. Naturalmente estas rocas se encuentran constituyendo domos salinos o en formaciones salinas estratificadas con intercalaciones de materiales sedimentarios no salinos; además poseen una composición química-mineralógica suficientemente homogénea (**Figura I. 10**) (Ruíz, 2014 & Flores, 2017).

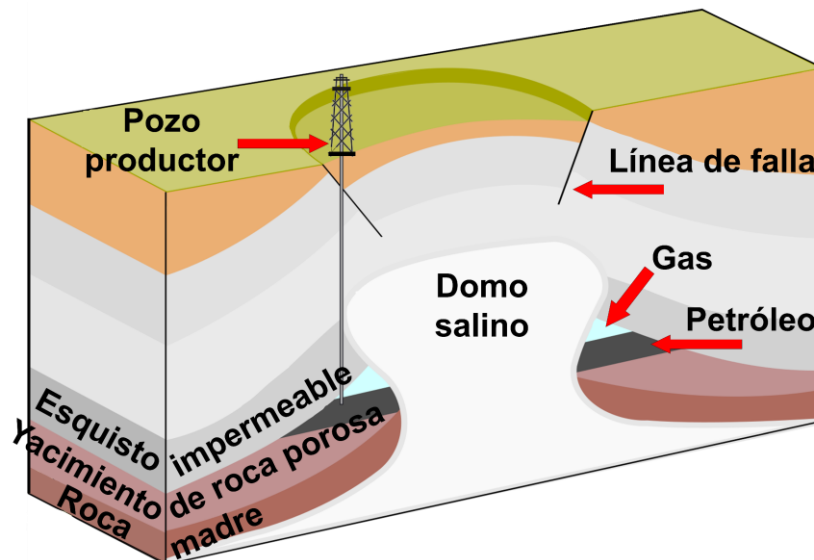


Figura I. 10. Esquema de un domo salino, se ha identificado que los domos de sal funcionan como trampas estructurales en sistemas petroleros. (Modificado de Baños & Sánchez, 2009).

Esta opción destaca por presentar una alta velocidad de llenado, una gran capacidad y que la salmuera obtenida tiene un potencial valor económico; por tanto es capaz de configurar un adecuado almacén geológico de CO_2 que puede ser temporal o permanente. Otro punto a favor es que el almacenamiento puede ocurrir sin la necesidad de preservar las condiciones de supercriticalidad y se puede dar en cavidades relativamente someras. Por otro lado, tiene en contra ser el medio que implica la inversión más cara, por esta razón se debe considerar como una opción que solo si no existe otro tipo de medio geológico, otra desventaja es que existe una gran incertidumbre sobre su comportamiento a largo plazo (Ruíz 2014 & Silvestre-Albero, 2014).

También es necesario poseer el conocimiento profundo del comportamiento que exhibirá la cavidad salina y los estratos superiores ante el proceso de fluencia con el objetivo de determinar la viabilidad del almacén ya que cuando se somete a esfuerzo el material salino adquiere el comportamiento de una sustancia viscoso-plástica induciendo a que se presente el proceso de fluencia. (Ruíz, 2014 & Shi et al, 2005).

De los proyectos construidos a escala comercial que almacenan CO_2 , ninguno tiene su yacimiento en cavidades salinas, no así en el espacio poroso de acuíferos salinos profundos de los que existen varios de los más grandes del mundo y que se explican más adelante.

B) Vetas de carbón no explotables.

Las capas de carbón son otro medio geológico capaz de fungir como almacén de CO_2 , con la adsorción como mecanismo de atrapamiento. Inyectando CO_2 en capas de carbón, donde la matriz porosa adsorbe el CO_2 , en consecuencia libera el CH_4 existente en la misma. El carbón tiene mayor afinidad por el CO_2 que por el CH_4 (por cada molécula de CH_4 que se desplaza permite la adsorción de 2 moléculas de CO_2), esto permite concluir la alta susceptibilidad de las capas de carbón por almacenar CO_2 , que además, trae un beneficio adicional al inducir la producción de un energético (CH_4) más limpio que el CO_2 , factor que reduciría los costos de inyección. Esta técnica se denomina ECBM (*Enhanced Coalbed Methane Production*) (**Figura I. 11**). Remarcar que, para el apropiado desarrollo de esta técnica capturar el CH_4 es obligado principalmente porque este gas tiene una

capacidad de efecto invernadero muy superior a la del CO_2 . Este almacén es posible en vetas carboníferas que no tengan algún valor económico, usualmente aquellas que se encuentran a profundidades por debajo de 600 m, el CO_2 se presentara en estado gaseoso, no en fase supercrítica (Bachu, 2000 & Ruíz, 2014).

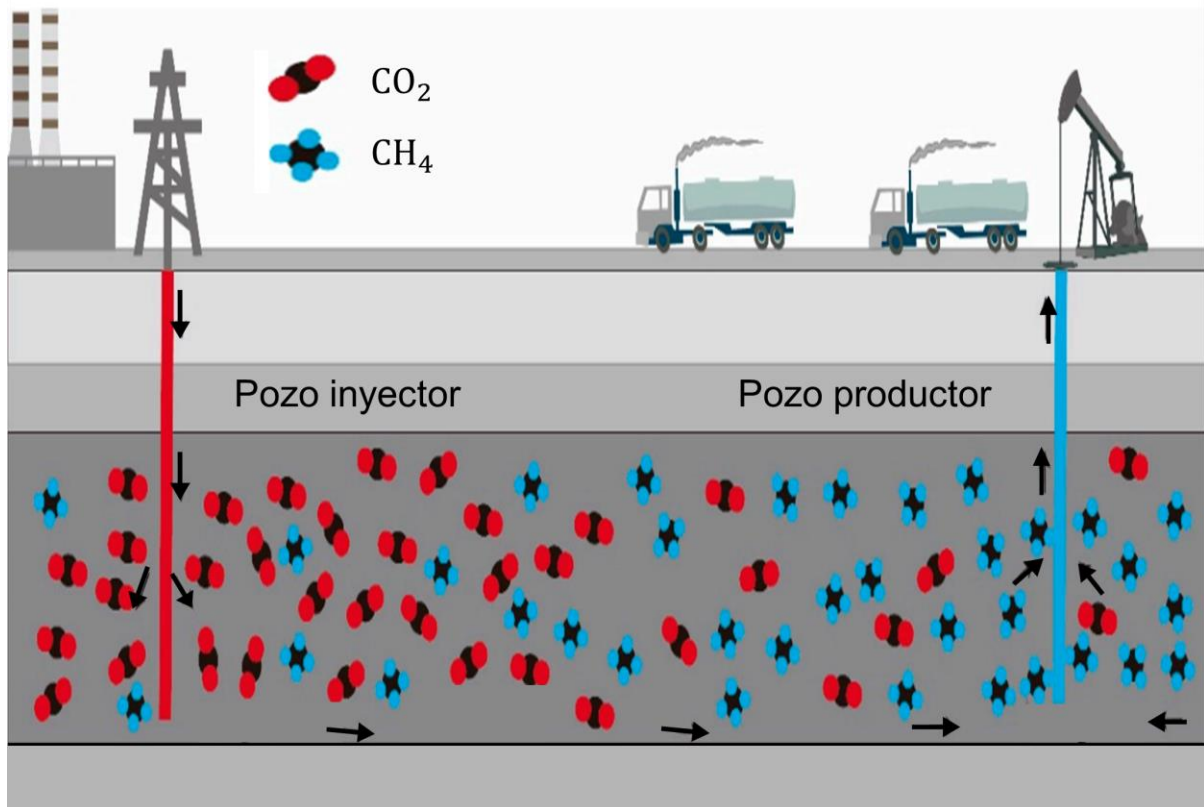


Figura I. 11. Esquema general del proceso de ECBM (modificado de Wang et al, 2018) .

Esta opción tiene un punto desfavorable: el CH_4 de los estratos de carbón se encuentra en cantidades muy reducidas y al momento de realizar ECBM en el yacimiento este queda inservible para la posteridad, ya que durante el proceso de inyección, extracción de metano y la interacción con la matriz, el CO_2 altera la permeabilidad y la capacidad de adsorción del carbón. Al adsorberse el CO_2 en el carbón se producirá el hinchamiento de la matriz que puede ocasionar fractura a partir del punto de inyección, y con esto, formar rutas preferentes de fuga. Otra forma en que este proceso se origina es al precisar fracturación hidráulica reiterada con el objetivo de establecer y preservar la comunicación entre el sondeo y las áreas permeables del carbón (Sandoval, 2019).

C) Acuíferos Salinos Profundos

Otro medio geológico para almacenar CO_2 son las formaciones permeables profundas con agua salina. Dichas formaciones están constituidas por rocas permeables y porosas que albergan agua salada, en el caso de rocas carbonatadas dentro de cavidades generadas por disolución y en formaciones compuestas por areniscas dentro del espacio generado por los granos. Son medios que estructuralmente están aislados a una profundidad superior a los 800 m donde usualmente no se encuentran formaciones con acuíferos de agua dulce. Por tales características, su aprovechamiento como recurso hídrico para consumo humano, agrícola o industrial no es factible. Estas estructuras geológicas han sido categorizadas por su gran extensión y por encontrarse a profundidades ideales para el eficiente almacenamiento, debido a que exhibe una alta capacidad de almacenar CO_2 (en términos de volumen). Además, se encuentran más próximos a fuentes emisoras de CO_2 debido a su ubicuidad (IPCC, 2005; Sandoval, 2019).

El CO_2 en estado supercrítico (fase del dióxido de carbono que tiene la capacidad de expandirse en todo el espacio disponible como un gas y a su vez presentar densidad de líquido) puede ser almacenado de forma conveniente en este tipo de medio geológico debido a que se encuentran sometido a presiones elevadas en términos relativos, lo cual permite que el gas presente una alta densidad. La efectividad de almacén en estos acuíferos ha sido probada mediante la inyección de residuos líquidos peligrosos y no peligrosos, por lo que existe documentación sólida que garantiza el proceso de confinamiento (Bachu, 2000; Muñoz et al, 2011; Ruíz, 2014).

La inyección de CO_2 en acuíferos a gran escala puede inducir un flujo de fluidos multifásico, transporte de solutos y reacciones químicas entre los fluidos y los minerales presentes en la formación, esto obliga a caracterizarlos muy escrupulosamente para evitar accidentes. Una vez que el CO_2 se inyecta en los acuíferos salinos profundos al estar a una densidad menor que la de la formación, el CO_2 supercrítico es capaz de alcanzar la parte superior de la formación de almacén atravesando el medio poroso de las rocas sin problema alguno. En tanto el CO_2 se encuentra en movimiento la salmuera toma el espacio que va liberando este gas. La salmuera es capaz de atrapar el CO_2 residual almacenando esta cantidad de gas que queda inmóvil en los espacios porosos

(mismos que se irán disolviendo con el paso del tiempo) (Ji, 2015 & Valle, 2015). Un ejemplo de este tipo de almacén es el del campo Sleipner en Noruega (**Figura I. 12**).

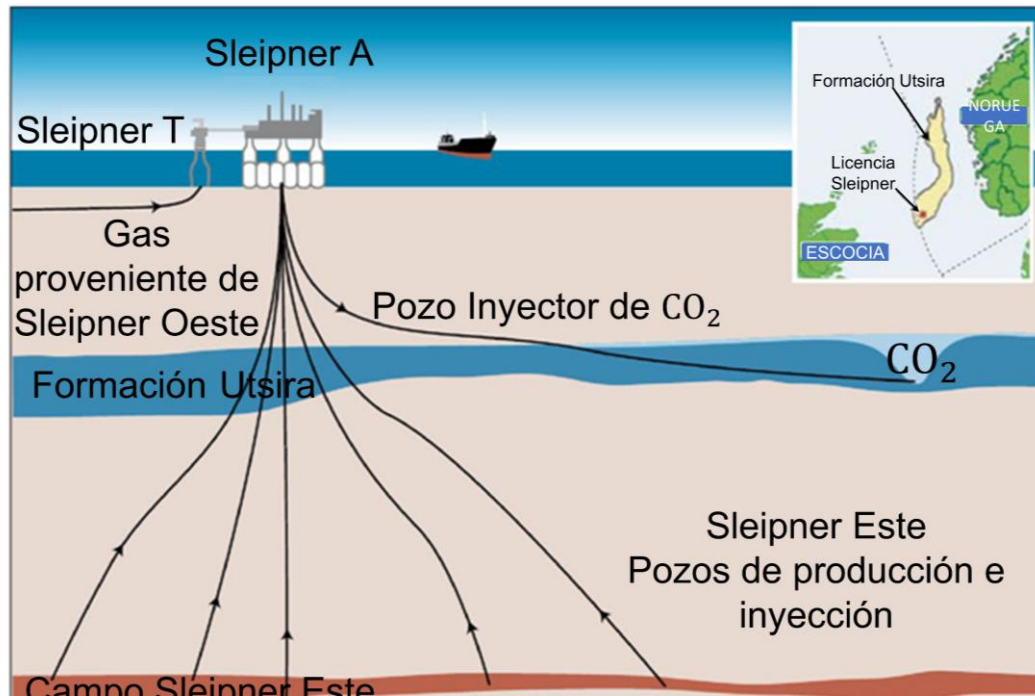


Figura I. 12. Esquema del proceso de inyección en la formación Utsira en Sleipner, proyecto punta de lanza en el almacén geológico de CO_2 (modificado de Ghaderi & Landro, 2009).

Estas formaciones, no se conocen con el mismo nivel de detalle que los acuíferos de agua dulce o los yacimientos de hidrocarburos, al momento de determinar su capacidad generalmente arrastra incertidumbres. El conocimiento disponible es tan escaso que limita a elegir regiones que han experimentado campañas exploración de hidrocarburos y donde se han descubierto trampas secas, no productivas. Además, en esta opción, la capacidad del sello por contener no ha sido demostrada y esta latente la posibilidad de que estas formaciones contengan recursos naturales por descubrir (CONAMA, 2008; Ruiz, 2014).

D) Yacimientos de Hidrocarburos

El CO_2 también puede almacenarse en yacimientos hidrocarburos agotados (principalmente en yacimientos de gas) o en campos en vías de agotamiento en este caso

utilizándose con el único fin de obtener una recuperación adicional de aceite o EOR (por sus siglas en inglés *Enhanced Oil Recovery*). Los yacimientos hidrocarburos tienen un alto potencial para almacenar por sus características *naturales*: rocas almacén probadas y rocas sello confinantes que garantizan la retención de fluidos (Ruíz, 2014).

1. Recuperación Mejorada de Aceite.

La finalidad de este método es inyectar el CO₂ en los yacimientos con la finalidad de aumentar la presión en los mismos y así obtener los hidrocarburos remanentes. Es económicamente viable ya que al obtener el hidrocarburo recuperado se podrían pagar los gastos de captura, transporte e inyección del CO₂. La recuperación mejorada del petróleo se realiza de varias formas, pero en términos generales mediante la inyección alternada de CO₂ y agua (**Figura I. 13**) (Sandoval, 2019).

De manera breve el proceso inicia con la inyección del CO₂ en la formación productora posteriormente se inyecta agua que actúa como mecanismo de empuje. Una parte del CO₂ se disuelve en el petróleo y se almacena en la formación. El resto del CO₂ produce la evaporación de las fracciones más livianas del petróleo en la fase CO₂, mientras que el CO₂ se condensa en la fase petróleo. Impulsado por la inundación con agua, el petróleo y cualquier resto de CO₂ residual llegan al pozo de producción y se bombean a la superficie. En superficie el CO₂ se separa del petróleo y se re envía al punto de inyección (Anzarizadeh et al, 2015).

La recuperación de petróleo con dióxido de carbono se limita a yacimientos de petróleo de más de 600 metros de profundidad, donde se recupera del 20 al 30 por ciento del aceite original y donde se han aplicado con antelación métodos de producción primarios y secundarios. Se puede obtener una recuperación incremental de aceite del 7 al 23 por ciento del aceite original en su lugar utilizando dióxido de carbono en la recuperación de aceite mejorada (Ramírez, 2011).

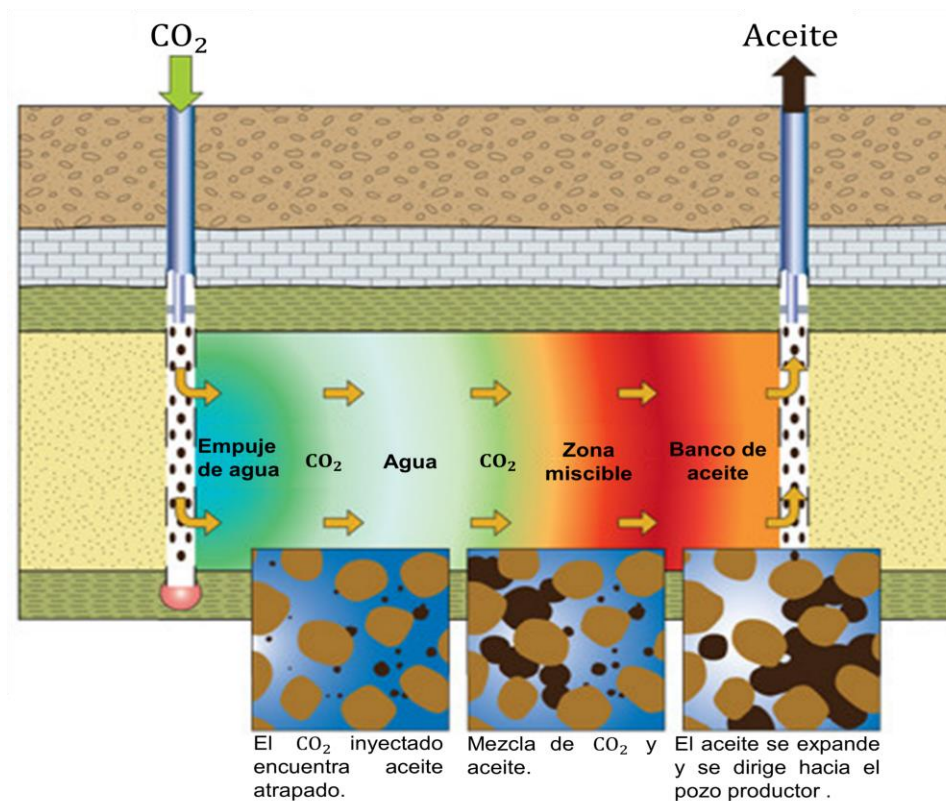


Figura I. 13. Proceso de EOR con Dióxido de Carbono (modificado de Nekabari, 2016).

2. Almacenamiento en yacimientos de hidrocarburo agotados.

También existe la opción de utilizar aquellos yacimientos de hidrocarburos que han dejado de ser explotados por agotamiento, cuando los recursos hidrocarburos han sido extraídos casi en su totalidad y se procede al abandono del mismo (**Figura I. 14**). Aunque el término “agotado” resulta relativo a los yacimientos de aceite en donde existe aceite residual en el sitio que debido a limitantes económicos y tecnológicos no puede ser recuperado en el presente inmediato, se considera que su producción pueda recuperarse en el futuro (estos yacimientos pueden catalogarse como en desuso). Derivado de esta situación los yacimientos de gas son los mejores candidatos para fungir de almacén geológico de CO_2 ya que en estos yacimientos el espacio poroso disponible no saturado por agua de formación es vasto, al registrarse la extracción de al menos un 90% de las reservas existentes (Ruíz, 2014).

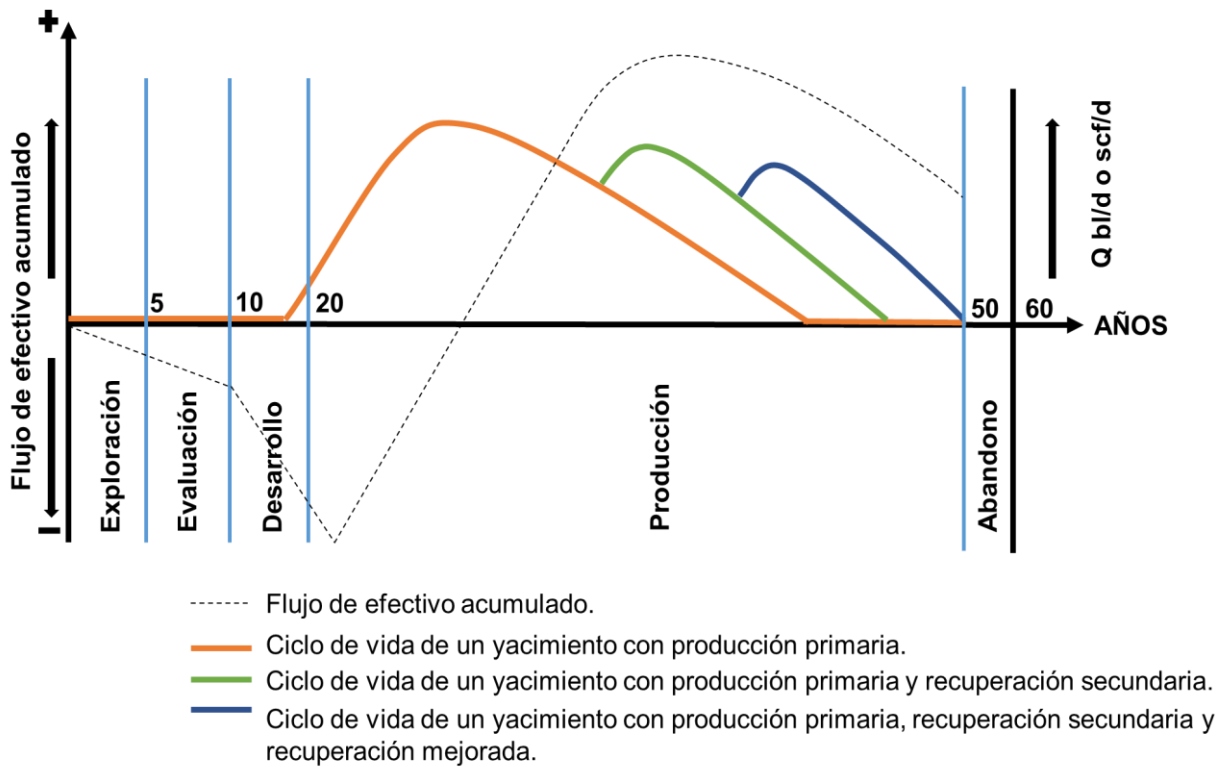


Figura I. 14. Esquema general del ciclo de vida de un yacimiento de hidrocarburos, donde la etapa de abandono indica el agotamiento del yacimiento (modificado de Velasco, 2017).

Los yacimientos de aceite que, derivado de la producción han sido despresurizados y cuyos pozos han sido taponeados adecuadamente, además de que no han sido invadidos por agua de formación pueden tener una capacidad de almacenamiento grande y ser considerados como almacenes geológicos. De ser invadidos los yacimientos independientemente si son de gas o aceite, reducen su potencial para el almacenamiento debido a que el CO_2 tendrá que desplazar el agua de formación comportándose más como acuíferos (Bachu, 2000).

Estos medios geológicos tiene como principales ventajas: la existencia de trampas geológicas (estructurales o estratigráficas) que a lo largo de millones de años han demostrado su eficacia y seguridad, la existencia de infraestructura industrial

desarrollada (instalaciones de superficie, bombas de inyección, sondeos, etc.) la cual es posible de utilizar y/o adaptar a las nuevas necesidades, la existencia de validaciones y estudios que permiten comprender la dinámica del flujo de fluidos dentro del yacimiento así como un avanzado entendimiento de la geología y petrofísica de la trampa y el sello. En el caso de yacimientos parcialmente agotados, la relación costo/beneficio es susceptible a mejorar debido a un notorio aumento en la producción de gas y/o crudo. La limitada y pobre distribución de yacimientos de hidrocarburos alrededor del mundo se exhibe como la principal desventaja así como la carencia de idoneidad de una parte de los yacimientos de gas y petróleo (en vías de agotamiento o agotados) para inyectar CO_2 (recuperación avanzada) debido a que puede generar la interrupción en los canales de flujo dentro de la formación almacenadora por la presión de gas inyectado. Además, no se puede descartar la posibilidad de existencia de fugas a través de los pozos abandonados consecuencia de un ineficiente sellado y que las condiciones de presión y temperatura no sean adecuadas para alcanzar el estado supercrítico del CO_2 (CONAMA, 2008).

I.3 Aspectos por considerar para la selección de un medio geológico a escala de cuenca sedimentaria.

Un emplazamiento geológico debe garantizar que el CO₂ se almacene de forma segura y permanente durante todo el tiempo que se requiera el cual puede ser hasta del orden de los miles de años, para ello es necesario analizar que, tanto aspectos intrínsecos como extrínsecos de la cuenca sedimentaria cuenten con ciertas características, se toma como base el análisis de una cuenca sedimentaria debido a que son los medios geológicos con mayor posibilidad de fungir como medio almacenador de CO₂. Para esto se consideran aspectos socio-económicos, de seguridad, medio ambientales y geológicos. De forma breve se describen las propuestas concentradas de parametrización de criterios de Bachu,2000; IPCC, 2005; CIEMAT,2006 y Dávila, 2011.

I.3.1 Conexión entre las fuentes de emisión y los emplazamientos para el almacenamiento.

En la disyuntiva de emplazamientos es obligado conocer las fuentes de emisión de CO₂ existentes y una serie de parámetros relacionados que pesarán sobre la viabilidad final del almacén, entre los más importantes (Bachu, 2000; Bachu, 2003):

- El desarrollo socio-económico futuro de la zona.
- Las características de las fuentes, tipo y magnitud de las emisiones.
- Las vías de comunicación ya desarrolladas o en vías de construcción para el transporte del CO₂.
- La distancia entre centros de emisión-almacén.
- La ponderación entre el volumen de almacén requerido y el volumen de almacén disponible.

La identificación de las fuentes emisoras es considerada por distintos autores como el paso número uno en el proceso de selección de emplazamientos. Esto consiste en inventariar los sitios emisores más importantes de acuerdo con su volumen (**Figura I. 15**). Como (CIEMAT, 2006):

- Las plantas de generación eléctrica a base de carbón y petróleo.
- Las industrias productoras de cemento.
- Las industrias petroquímicas
- Las industrias de procesamiento de gas.

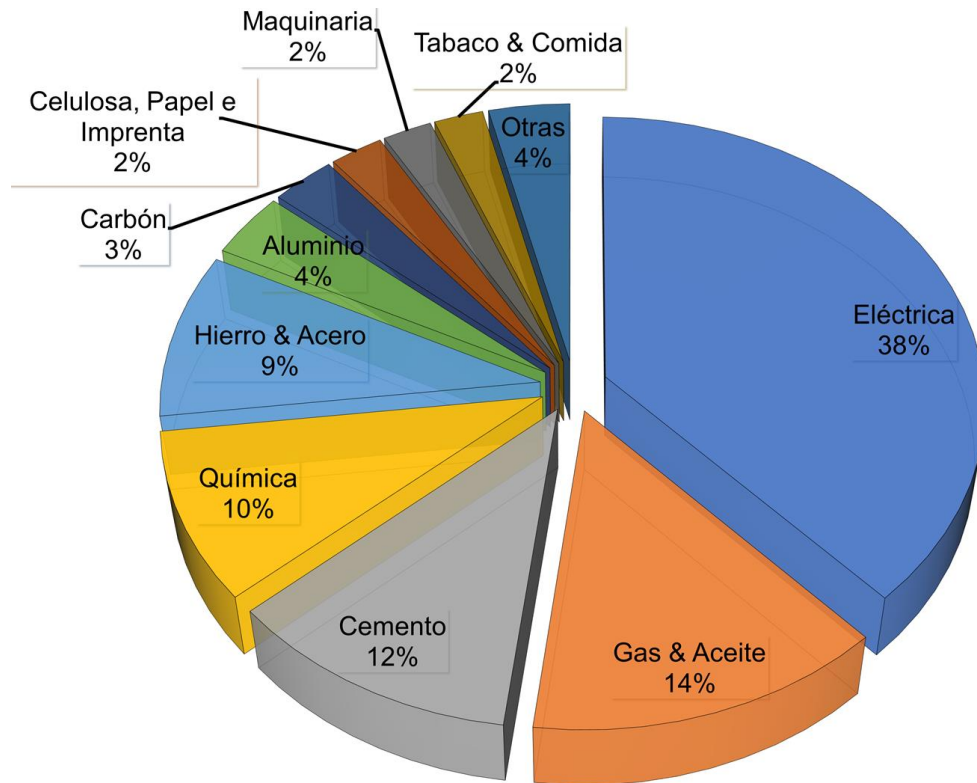


Figura I. 15. Principales industrias con aportes a la emisión de CO₂ (%) de fuentes antropogénicas y estacionarias en 2005 (modificado de Gale et al, 2005).

La elaboración del inventario debe considerar por lo menos: la geo posición, el giro industrial de la fuente y, la cantidad y composición de las emisiones (CIEMAT, 2006).

La presencia de industria avocada a la explotación de hidrocarburos en la zona puede significar un impacto favorable para el desarrollo de proyectos de CO₂, debido a que implica la existencia de infraestructuras (carreteras, pozos, red de oleoductos y gasoductos, etc.) que permitirán que el transporte y transferencia del CO₂, y su

subsiguiente inyección en una formación geológica seleccionada sean procesos menos complicados y los costos asociados sean menores. Caso contrario a las cuencas denominadas inmaduras donde cualquier tipo de adecuación resulta más onerosa, debido al pobre entendimiento del medio geológico al no contar con suficiente información geológica e hidrogeológica, además, la infraestructura es inexistente o rudimentaria (CONAMA, 2008; Ruíz, 2014).

Se debe dar preferencia a zonas próximas a grandes focos emisores de CO₂ así como aquellas que se encuentren cercanas a líneas de transporte y distribución (oleoductos y gasoductos). Estas condiciones afectan profundamente a la inversión final de cualquier proyecto de almacenamiento de CO₂ por tanto considerarlas en etapas tempranas de la elección de sitios, previo a la caracterización detallada de los emplazamientos candidatos es importante (Ruíz, 2014)

I.3.2. Contexto geodinámico.

Geológicamente es posible identificar zonas de rango mayor: cuencas sedimentarias, zonas cratónicas y orógenos. Las últimas dos opciones se consideran no idóneas para albergar proyectos de almacenamiento de CO₂, debido a que las rocas que conforman a estas estructuras no cuentan con características adecuadas para este fin, debido a que las rocas son cristalinas y normalmente muy fracturadas, a su vez esta última condición origina que no existan formaciones que puedan fungir como barreras impermeables (sellos). En contraparte las cuencas sedimentarias se constituyen por rocas porosas y permeables, además de ser áreas poco o nada fracturadas; por ende las cuencas sedimentarias son las mejores candidatas para albergar el CO₂ (CIEMAT, 2006).

La ubicación de las cuencas sedimentarias dentro de la placa continental es un factor que contribuye a que se les considere los sitios con mayor susceptibilidad a fungir como almacenes geológicos de CO₂ (**Figura I. 16**). A su vez es necesario mencionar que no todas las cuencas sedimentarias son lo suficientemente adecuadas para el almacenamiento, se pueden distinguir diferentes tipos de cuencas sedimentarias: aquellas que se localizan en zonas tectónicamente activas son las menos recomendables debido al potencial riesgo de escape de CO₂, en todo caso deben ser cuidadosamente estudiadas; las cuencas localizadas dentro de orógenos generados por la colisión entre

placas, constituyen buenos objetivos y deben ser consideradas para el proceso de selección; finalmente las cuencas ubicadas cerca o al centro de los límites continentales estables son excelentes objetivos para considerar como lugares almacenadores de CO₂ porque cuentan con la estructura y la estabilidad necesaria para ello. (Bachu, 2000; Benson & Cook, 2005).

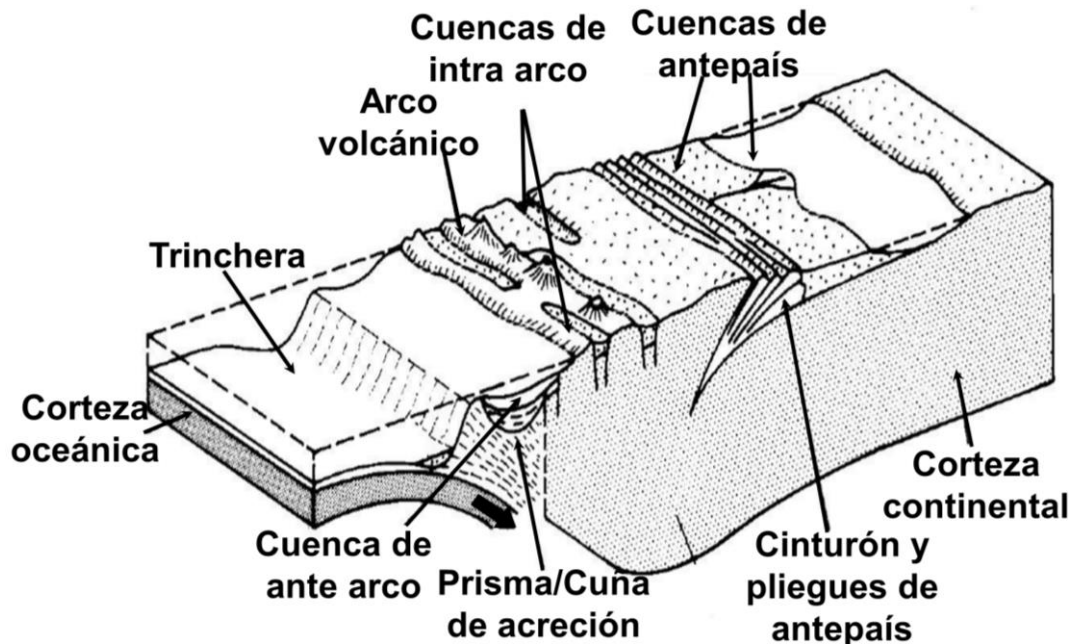


Figura I. 16. Esquema de las cuencas sedimentarias asociadas a un margen continental convergente (modificada de Einsele, 1992).

I.3.3. Fracturación y Sismicidad.

Otro aspecto geológico que debe considerarse para determinar la susceptibilidad de un área para fines de almacenamiento es el análisis de deformación y fracturación originada por el contexto geodinámico y su relación con la sismicidad. Este aspecto debe indicar si la zona garantiza la seguridad del almacén tomando como referencia la actividad sísmica. Para esta técnica, se deben seleccionar zonas donde se registre una baja o nula actividad sísmica, de esta forma se indica que la sismicidad no producirá alteraciones significativas en las propiedades de las formaciones almacén y sello (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006; Dávila, 2011)

Determinar cuándo, dónde y cómo se originara un terremoto no es posible aún, sin embargo con base en la experiencia ha sido posible identificar áreas susceptibles a la generación de sismos, la intensidad con la que pueden presentarse y la respuesta del medio geológico. De esta experiencia se ha podido determinar el estado del conocimiento el cual se permite detectar fallas activas y condicionantes geológicos, como son: la datación del último evento de deslizamiento sísmico, velocidad de deformación, campos de esfuerzo e indicadores geomorfológicos de actividad actual o reciente (Cuaternario) y el régimen tectónico. En este contexto se ha identificado que los límites entre placas tectónicas determinan la actividad sísmica de una región, siendo aquellos límites convergentes y transformantes en donde se registra el mayor número de sismos a nivel mundial caso contrario a los límites divergentes donde la sismicidad y fracturación tiende a ser muy baja casi nula (**Figura I. 17**) (CIEMAT, 2006; CENAPRED, 2014).

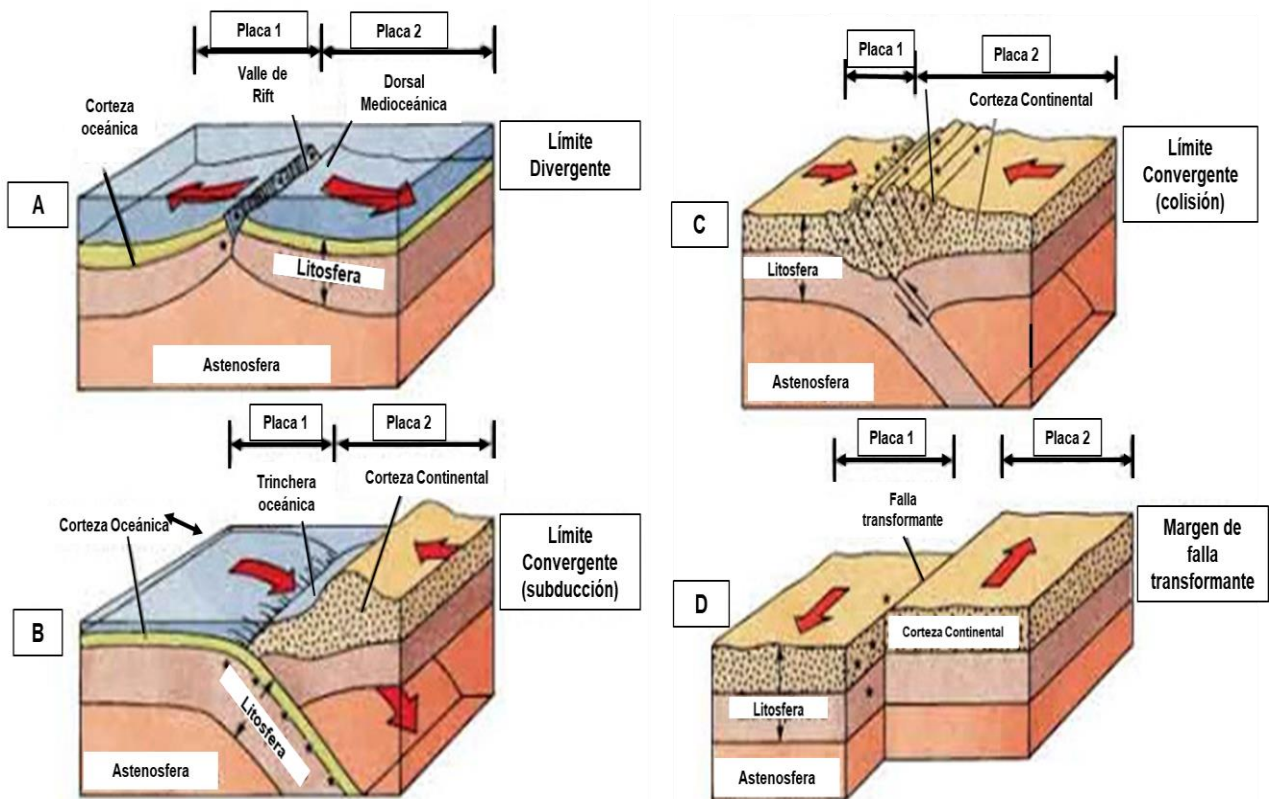


Figura I. 17. Límites de placas tectónicas (A) divergente, (B) convergente por subducción, (C) convergente por colisión y (D) transformante (modificada de Wiley, 1999).

En el caso de la fracturación esta puede ser inducida durante el proceso de inyección del CO₂, este fenómeno se presenta cuando la presión de inyección supera a la presión hidrostática de la formación almacén; provocando la generación de vías de escape. Por tanto para evitar el fracturamiento inducido es importante que se conozcan los: i) esfuerzos in situ y ii) la presión máxima de inyección; parámetros que se obtienen de un estudio geo mecánico (CIEMAT, 2006).

El análisis de la integridad del emplazamiento también tiene por objetivo evaluar las posibles perturbaciones derivadas de posibles alteraciones negativas de las propiedades de las formaciones almacén y sello como consecuencia de interacciones CO₂ – agua-roca, futuras intrusiones humanas (sondeos) y de la inyección (micro sismicidad y reactivación de fallas, fracturas) (CONAMA, 2008).

I.3.4. Existencia de formaciones almacén y sello.

Durante la selección de cuencas sedimentarias para fines de almacenamiento geológico de CO₂ existe un aspecto que es imprescindible, la existencia de formaciones constituidas por rocas que:

- Tengan una permeabilidad adecuada, es importante que las formaciones involucradas no presenten variaciones importantes de permeabilidad en todo su dominio, de esta forma se favorece una inyección de CO₂ sencilla en la formación almacén y constituir una adecuada barrera (formación sello) que impida la fuga del CO₂ respectivamente.
- Cuenten con una porosidad y potencia suficiente que permitan almacenar grandes cantidades de CO₂ en la formación almacén y que no sea un obstáculo para conformar la barrera impermeable (**Figura I. 18**).
- Ambas formaciones deben tener una configuración geométrica puntual donde exista continuidad y homogeneidad litológica, se considerará una excelente formación almacén aquellas que tengan una gran extensión lateral y sin perturbaciones mientras que deberá encontrarse obligadamente a techo e idealmente a muro la formación sello, previniendo posibles fugas de CO₂ a estratos superiores y en última instancia a la biosfera.

Un criterio excluyente es la ausencia de alguna de estas dos formaciones y/o su posición relativa (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006; Ruíz, 2014).

La separación física y permanente del CO_2 almacenado de la biósfera deberá estar garantizada por el medio geológico. La exigencia al medio por poseer estructuras estratigráficas o estructurales (trampas) en profundidad, y en conjunto con otros factores geológicos permite garantizar la estanqueidad del CO_2 en la formación almacén a corto, medio y largo plazo (Ruíz, 2014).

La estimación del volumen total que puede almacenarse en la formación almacén requiere necesariamente de conocer la porosidad representativa y la potencia de la formación almacén, y con base en la temperatura, presión y densidad del CO_2 almacenado es posible transformar la estimación a términos de toneladas de CO_2 almacenado. Esta estimación puede incrementarse si se presentan fenómenos de atrapamiento mineral. (Martínez & Nava, 2008; Ramírez, 2011).

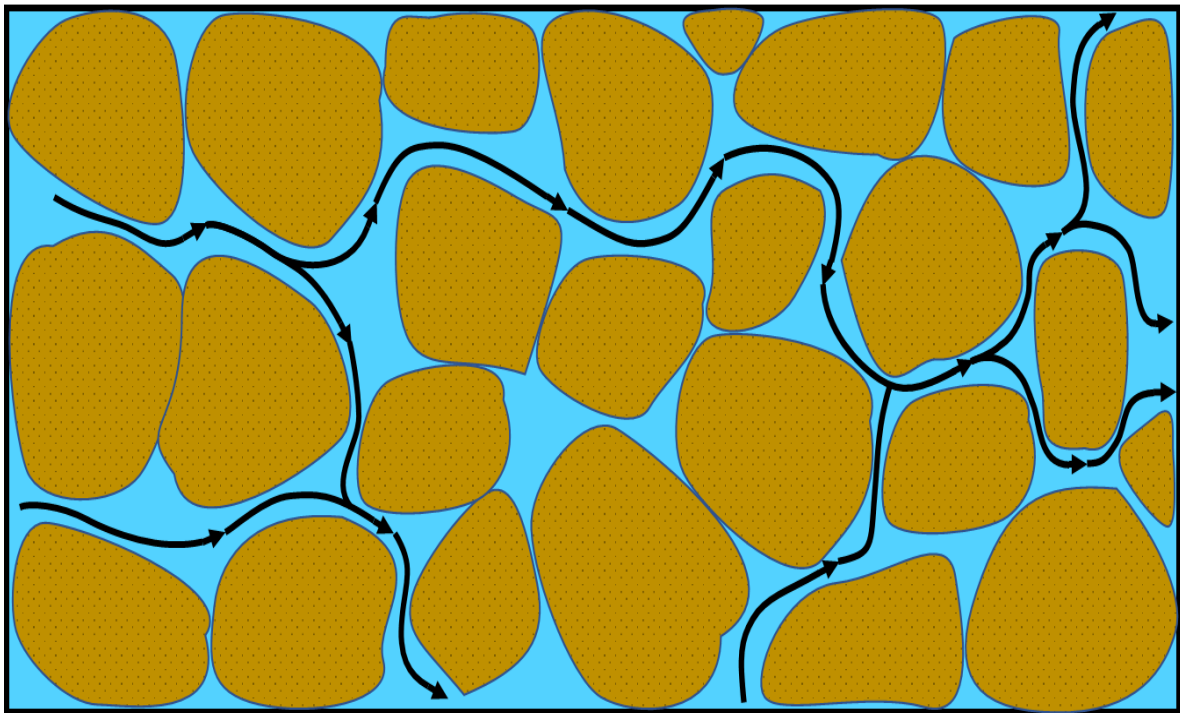


Figura I. 18. Esquema de la permeabilidad y la porosidad de una roca almacén, características necesarias para el almacén de CO_2 (modificada de Andersen & Kleim, 2014).

El caudal de inyección del CO₂ estará determinado por la permeabilidad de las rocas que conforman a la formación almacén. Se busca que la inyección se realice en zonas donde se reporten altos valores de permeabilidad, de esta forma se asegura que el medio soporta la presión de inyección sin riesgo de generar fracturas que serían vías de escape preferentes para el CO₂ almacenado (CIEMAT, 2006).

I.3.5. Litologías favorables.

Se ha identificado una serie de litologías que, de constituir preponderantemente una formación, cuentan con los requerimientos para calificarla como almacén o como sello. Estas litologías cuentan con características texturales y composición mineralógica que en combinación con el CO₂ puede dar pie a reacciones químicas que influyen en el potencial de captura y/o atrapamiento. (CIEMAT, 2006; Galarza, 2013)

Las litologías involucradas en este sistema de almacenamiento tienen objetivos diferentes: la formación sello actuar como una barrera impermeable mientras que la formación almacén debe ser capaz de almacenar grandes cantidades de CO₂ y permitir su fácil inyección, por ello cada una tienen características propias (CIEMAT, 2006)

Entre las rocas sedimentarias, las areniscas y las calizas (u otras rocas carbonatadas), pueden presentar una porosidad y permeabilidad relativamente altas para contener fluidos y poder transmitirlos (Ruíz, 2014).

Las areniscas se caracterizan por tener una gran porosidad primaria. Esta litología ha sido catalogada como la de mayor porosidad y permeabilidad dentro de las rocas sedimentarias, un número importante de acuíferos y yacimientos de hidrocarburos están constituidos por estas rocas. (CONAMA 2008; Galarza 2013)

Otra litología que puede fungir como almacén son las calizas siempre y cuando presenten una alta porosidad secundaria (obtenida de procesos de fracturación o disolución), debido a que las calizas sanas y no fracturadas se caracterizan por exhibir una porosidad primaria baja originada por la disposición original de sus componentes texturales, por ende tienen un casi nulo potencial de almacenar fluidos. Al inyectar CO₂ en formaciones calizas, una parte se disolverá en el agua, produciendo un ácido carbónico débil, además se producirá la disolución de muchos de los minerales carbonatados, con lo cual se

deberá tener precaución ya que pueden verse afectadas las macro propiedades de porosidad y permeabilidad de la roca de manera significativa reduciendo la capacidad de almacenamiento. Por otra parte, carecen de minerales reactivos, por tanto no favorecerá el atrapamiento mineral del CO_2 existe la posibilidad de que exista precipitación de carbonatos en áreas alejadas del pozo de inyección solo si las condiciones de presión y temperatura se modifican . (Ramírez, 2011; Ruíz, 2014).

Las litologías que han mostrado contar con las características necesarias para constituir una formación sello son las rocas evaporíticas y lutitas. El reducido tamaño de poro que presentan permiten que las condiciones de sellado sean buenas; para transmitir fluidos y saturar la roca requiere de altas presiones capilares (CONAMA, 2008)

Adicionalmente la disposición en láminas de las lutitas favorece a que el agua de formación fluya horizontalmente, y garantiza su función como barreras impermeables que impiden la migración vertical del CO_2 . Las lutitas usualmente cuentan con altas concentraciones de minerales capaces de aportar cationes que permiten atrapar el CO_2 en forma de carbonatos (feldespatos y arcillas ricas en Fe y Mg, fundamentalmente cloritas). Además de carbonatos cementando la roca, las rocas evaporíticas también suelen presentar arcillas en su composición, pero su carácter impermeable por naturaleza las hace ideales para esa función (Ruíz, 2014).

El atrapamiento mineral se presenta bajo condiciones físicas y de composición específicas para la formación sello diferentes a las de la formación almacén. Bajo la explicación de Johnson et al. (2004) en una formación sello compuesta por lutitas, las interacciones químicas (fluido rico en CO_2 con minerales de la lutita) se originan principalmente entre el límite de la formación sello y la formación almacén, también es posible que estas interacciones ocurran a lo largo de microfracturas de la lutita (intra-shale) por donde el CO_2 puede penetrar. En estas condiciones, el fluido se desplaza por difusión y advección, de forma más lenta en comparación con el acuífero, mientras el CO_2 interacciona con las rocas que están constituidas principalmente por clorita, cuya concentración total en Fe y Mg es mucho mayor que en el acuífero. Este escenario resulta más adecuado para la precipitación de carbonatos, en virtud de que se puede alcanzar una mayor concentración de Fe y Mg en el fluido a través de la disolución de silicatos.

Este proceso de atrapamiento mineral es de vital importancia porque continuamente reduce la permeabilidad y porosidad de las lutitas (rellenando poros y fracturas) y, por ende, favorecerá el aislamiento (CIEMAT, 2006).

I.3.6. Régimen geotérmico y de presión.

Determinar el régimen geotérmico y de presión que gobierna en la cuenca sedimentaria es necesario para la determinación de emplazamientos favorables para el almacenamiento CO_2 ya que incide directamente en la determinación de la profundidad de inyección, la capacidad de almacén y el comportamiento del CO_2 en el medio.

Estudios previos han asumido tácitamente que en una cuenca sedimentaria la distribución de presión es hidrostática, incrementando con la profundidad linealmente, alrededor de 1MPa por cada 100 metros. Bajo esta consideración y tomando el gradiente geotérmico promedio de la Tierra ($25^\circ C/km$), se estableció teóricamente que, para que el CO_2 se presente en su estado supercrítico el techo de la formación almacén debe estar a profundidades mayores a 800 metros, por tanto el límite inferior para la inyección del gas (las condiciones a las que se forma la fase supercrítica se presenta su diagrama de fase mostrado en la **Figura I. 19**). Aunque es necesario indicar que las condiciones geotérmicas e hidrodinámicas no necesariamente se comportan como en la teoría y por ende varían de cuenca a cuenca, de lugar a lugar y de intervalo sedimentario a otro (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006; Dávila, 2011).

El régimen geotérmico en cuencas sedimentarias depende de (CIEMAT, 2006):

- Tipo de cuenca sedimentaria, edad y tectonismo.
- Proximidad a fuentes de emisión de calor en la corteza, como cámaras magmáticas, cuerpos intrusivos y volcanes;
- Flujo de calor en el basamento;
- Conductividad térmica y producción de calor en la sucesión sedimentaria, que depende de la litología y la porosidad de las rocas sedimentarias;
- Temperatura en la cima de la sucesión sedimentaria, por ejemplo:

Cuencas	Región	Temperatura [°C]	Ejemplo
Continental	Tropical	25-27	Llanos, Colombia
Continental	Templada	4-7	Alberta, Canadá
Oceánicas	Fondo oceánico	3-4	
Continental/ Oceánicas	Árticas (fondo de la zona de permafrost)	-2	Norte de Alaska Beaufort – MacKenzie Siberia

De manera particular se ha identificado que en cuencas tropicales y sub tropicales a baja altitud, como las cuencas de Texas, Venezuela, Colombia, Ecuador, África y Medio Oriente el CO_2 puede inyectarse solamente como gas o en estado supercrítico debido a que la isoterma de 31.1 °C se alcanza a profundidades someras, variando de entre 150 y 500 metros; mientras que, en cuencas templadas y oceánicas, como las de Michigan, Alberta y del Mar del Norte, CO_2 puede ser inyectado y almacenado como gas, líquido o en estado supercrítico, el estado dependerá en la presión, régimen geotermal y la profundidad de la isoterma de 31.1 °C (Bachu, 2000).

También se ha identificado que el CO_2 puede ser almacenado de forma segura como un hidrato sólido en sedimentos oceánicos someros o por debajo del permafrost en cuencas árticas, a profundidades mayores a varios cientos de metros donde las condiciones para la formación de hidratos se encuentra. En esta forma, el régimen geotérmico en la cuenca impacta en el tipo y profundidad de la inyección y almacén de CO_2 (Bachu, 2000).

Cuando en la cuenca se presenta un gradiente geotérmico bajo (~25° C/km) debido a que permite que las condiciones de supercriticidad se encuentren a menores profundidades en comparación a cuencas que presentan gradientes altos, impactara favorablemente.

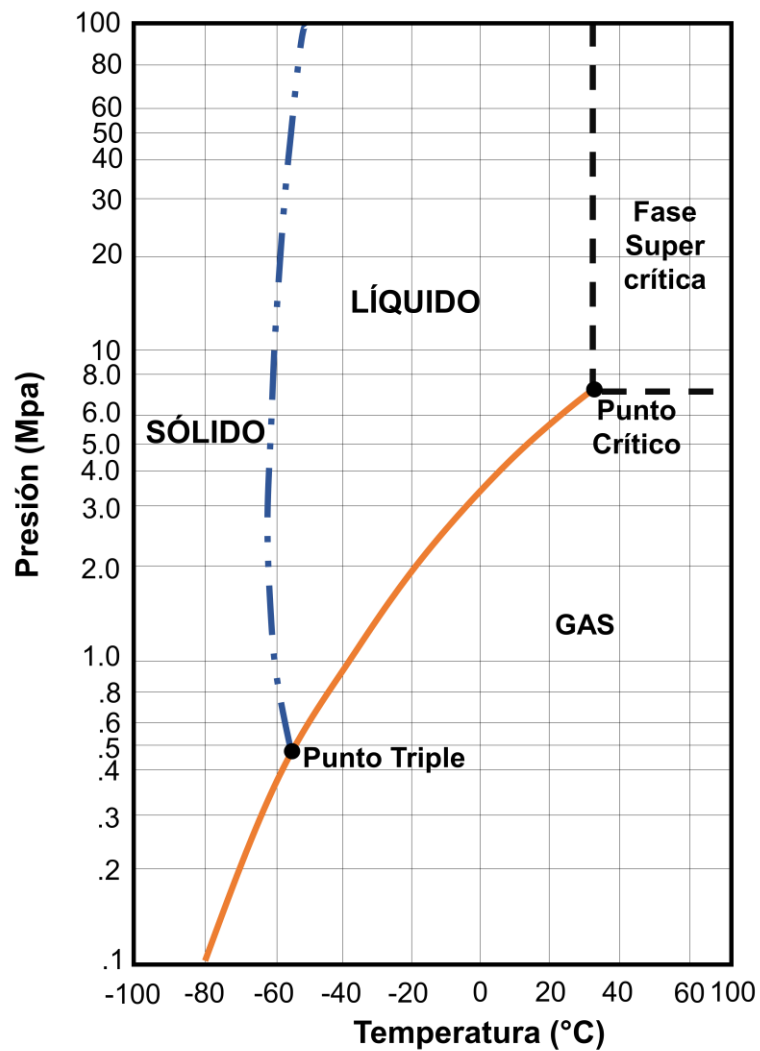


Figura I. 19. Diagrama de fase del Dióxido de Carbono (modificada de Bachu, 2000).

Por último, con base en la profundidad mínima necesaria tomando como referencia el techo de la formación almacén para garantizar la supercriticalidad del CO_2 , es necesario buscar cuencas cuya potencia de sedimentos sea superior a los 1000 metros donde existe una factibilidad alta de que se presenten las condiciones de presión y temperatura propias para este fin. Con base en el factor de compresibilidad del CO_2 estas condiciones permiten garantizar que el volumen almacenado sea el máximo posible (CONAMA, 2008) (**Figura I. 20**).

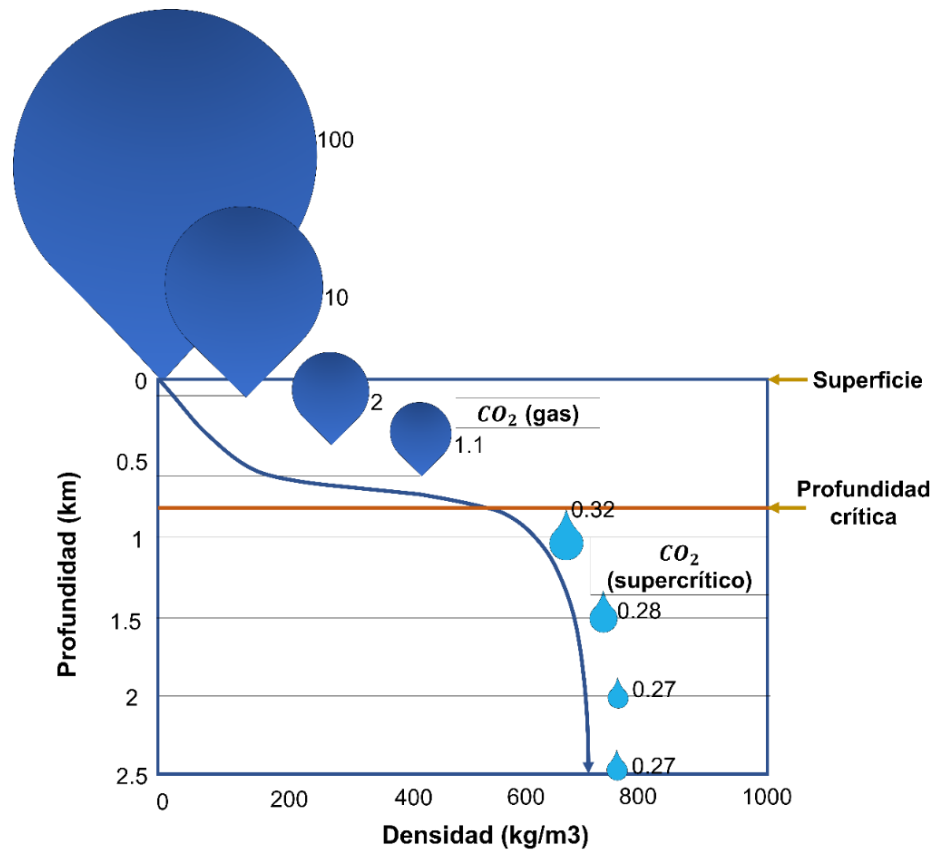


Figura I. 20. Aumento de la efectividad del almacenamiento con la profundidad (modificada de CONAMA, 2008).

I.3.7. Régimen hidrodinámico.

Todos los yacimientos hidrocarburos son el resultado de una migración secundaria de los hidrocarburos a través de acuíferos y atrapamiento en varias trampas. Como resultado, es común que los hidrocarburos estén en contacto con el agua de formación. La inyección de CO₂ en yacimientos activos o en desuso puede ser afectado o influenciado por el flujo del agua de formación. En los acuíferos salinos entender el comportamiento del agua y del flujo es básico debido a que el atrapamiento hidrodinámico es uno de los principales mecanismos de atrapamiento que se presentan en esta opción. El agua de formación también puede estar presente, alguna veces en abundancia, en vetas de carbón. La inyección de CO₂ en vetas de carbón afectará la presión, régimen de flujo y salinidad de

la formación y el agua producida. De esta forma el régimen hidrodinámico del agua de formación es crítico para la inyección y almacenamiento de CO₂ en yacimientos hidrocarburos agotados, vetas de carbón y acuíferos salinos profundos (CIEMAT, 2006; Mariño & Moreno, 2018).

Se han identificado 4 mecanismos que controlan el flujo del agua de formación de las cuencas sedimentarias (**Figura I. 21**). El primer mecanismo está dominado por la compactación provocando la expulsión del agua de los acuitardos en dirección vertical y de forma lateral a través de los acuíferos correspondientes. Este mecanismo se presenta en cuencas localizadas en las zonas de subducción y en la plataforma continental (Ruíz, 2014).

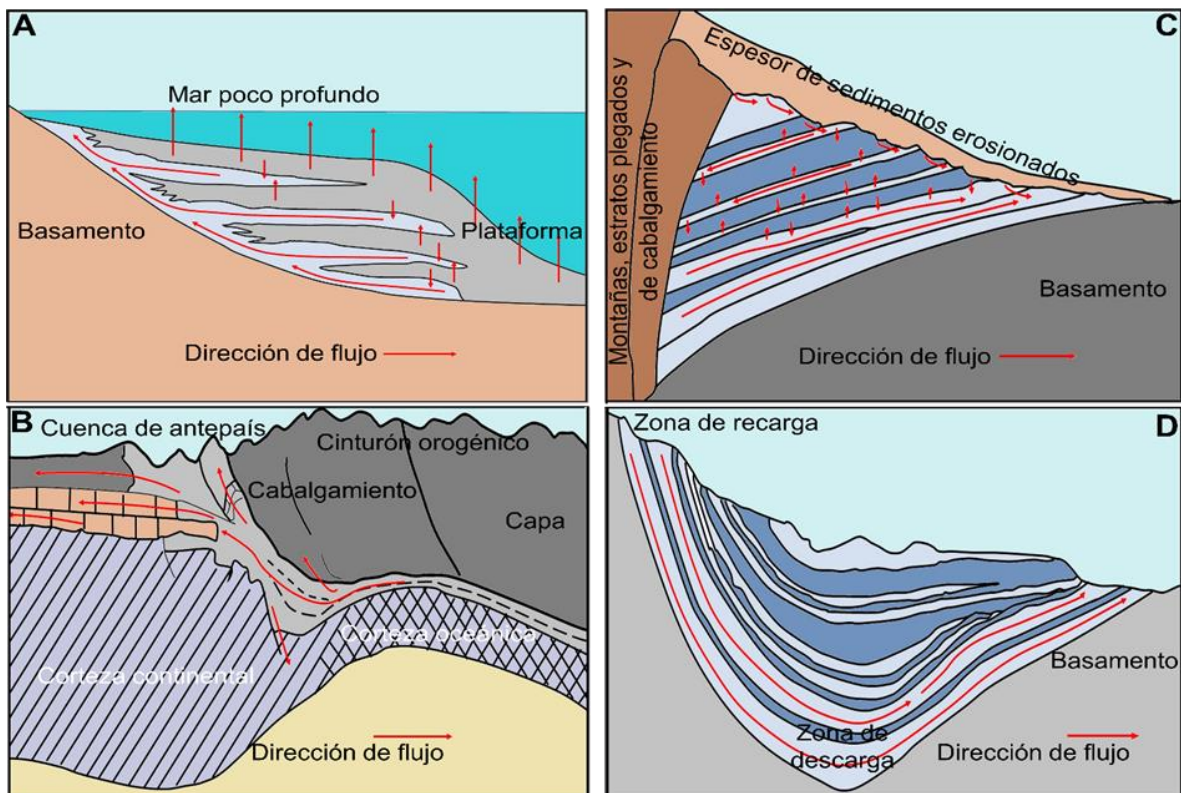


Figura I. 21. Representación gráfica del flujo controlado por A) compactación, B) compresión tectónica, C) rebote erosivo y D) topografía (modificada de Bachu, 2000).

El segundo mecanismo es la compresión tectónica, donde el agua de formación es expulsada hacia los márgenes. El agua de formación sujeta a este mecanismo tiene la

característica de estar presurizada, ser altamente salina y caliente; se sugiere no realizar almacenamiento de CO₂. Las cuencas que presentan este mecanismo son aquellas localizadas en las proximidades de cinturones orogénicos activos (Bachu, 2000, CIEMAT, 2006).

El tercer mecanismo que gobierna el flujo del agua de formación es el que se presenta en cuencas intracratónicas donde se ha registrado una reciente elevación y una erosión notable, por rebote erosivo (por elevación isostática - erosión), el flujo se dirige verticalmente a los potentes acuitardos conformados por lutitas y lateralmente hacia el interior de la cuenca en acuíferos adyacentes con baja potencia. Usualmente los acuitardos y acuíferos adyacentes se encuentran a condiciones de sub presión (la cuenca de Alberta exhibe esta condición) y son exactamente estos acuíferos los candidatos mejor evaluados para el atrapamiento hidrodinámico a largo plazo (escala de tiempos geológicos) del CO₂ (Bachu, 2000, CIEMAT, 2006).

El cuarto mecanismo es la topografía, donde se identifican zonas de carga y descarga. Los acuíferos presentes tienen presiones similares a la hidrostática (ligeramente por debajo o por encima) y dependen de la distribución de permeabilidad. En estos casos se recomienda realizar la inyección de CO₂ en zonas de descarga con el objetivo de incrementar la longitud de las líneas de flujo y por ende, los tiempos de tránsito. Este mecanismo es característico de las cuencas continentales (Bachu, 2000, CIEMAT, 2006).

Existen casos documentados de cuencas intracratónicas y de borde (por ejemplo la de Williston y la de Alberta respectivamente) donde el agua de formación tiende a mantenerse inmóvil o con ritmos de flujo muy lentos (<1 cm/a ó 10 km/Ma), comúnmente estas cuencas están aisladas hidrodinámicamente a un largo plazo, aunado a tiempos de residencia tan largos puede propiciar la mineralización del CO₂.

En el caso de los acuíferos que se consideren como almacén deben garantizar el aislamiento para evitar vías de escape hacia acuíferos más someros y en última instancia a superficie, en este caso dicho aislamiento se consigue mediante la presencia de acuitardos (lutitas) o acuícludos (capas de sal o anhidrita) cubriendo al acuífero. (Ruíz, 2014).

I.3.8. Factores hidrogeoquímicos.

En proyectos de CCS al momento de inyectar el CO_2 en la formación almacén ocurre una serie de cambios físicos y geoquímicos dentro y alrededor de la formación almacén, los cuales deben evaluarse para garantizar que el CO_2 este adecuadamente aislado de la superficie así como de otros estratos geológicos, evitando un posible daño a recursos, ecosistemas y al ser humano. Los posibles cambios son (i) la sustitución de salmuera por CO_2 en estado supercrítico dentro del medio poroso cercano a la zona de inyección, (ii) la disolución del CO_2 en la salmuera, (iii) las reacciones entre la salmuera enriquecida con CO_2 con las rocas de la formación almacén y sello (alcanzando un nuevo equilibrio geoquímico), (iv) el incremento de presión sobre una amplia área dentro de la zona de inyección, así como (v) la interacción de la salmuera enriquecida con los aceros y cementos de los pozos inyectoros (Hovorka & Lu, 2019).

El efecto de estos cambios puede ser negativo o positivo para el almacenamiento de CO_2 , por un lado existe el riesgo de dañar (decremento de permeabilidad) las propiedades del yacimiento que en consecuencia reducirán la capacidad de almacenar fluidos, también de manera negativa se puede afectar el sistema confinante disminuyendo la habilidad para retardar el movimiento de los fluidos. Positivamente la disolución del CO_2 supercrítico en la salmuera así como la precipitación de minerales puede reducir el riesgo de fuga que tiene la flotabilidad del CO_2 supercrítico (CIEMAT, 2006; Galarza, 2013; Hovorka & Lu, 2019).

Estos cambios se deben principalmente a la capacidad del CO_2 por disolverse en salmuera formando iones de carbonato y liberando a su vez la liberación de hidrogeno. Esta disolución inicia una variedad de reacciones entre el agua de formación y los minerales de formación. La solubilidad y la especiación conllevan procesos complejos que dependerán de la presión, temperatura y concentraciones iónicas. Las salmueras ácidas disuelven rápidamente minerales carbonatados y más lentamente disuelve feldespatos, arcillas y otros silicatos. La disolución del carbonato y de minerales silicatos incrementa el pH y resulta en la precipitación de arcillas y carbonatos en regiones distales lejos del pozo inyector (Hovorka & Lu, 2009)

Estudiar las distintas interacciones que se pueden presentar en un proyecto de CCS es importante, lo cual se consigue básicamente a partir de un análisis en laboratorio, de este depende confirmar su viabilidad a largo plazo. Anticipar la necesidad de un programa de monitorización y vigilancia sobre posibles fugas del CO₂, es imperiosa con el objetivo de verificar la seguridad y estabilidad del almacén con el tiempo (Galarza, 2013).

I.3.9. Factores legales, sociales, medio ambientales y de seguridad.

Para el desarrollo de un almacén geológico debe considerarse la aceptación del público, preferentemente deben evitarse el desarrollo de estos en zonas pobladas, zonas donde existan recursos explotables y de potencial interés estratégico (económico, cultural y/o medio ambiental) (CIEMAT, 2006; NETL, 2017).

También los aspectos legales deben considerarse, cabe mencionar que la mayoría de los países no cuenta con una regulación propia para este tipo de prácticas, la estrategia que algunos han optado por es tomar como referente normas, estatutos y leyes mineras, de preservación de recursos, de agua potable, de almacenamiento de residuos, de producción de gas & petróleo y de tratamiento y disposición de gases de alta presión, adecuándolas para los fines de inyección y almacenamiento de CO₂ (CIEMAT, 2006). Aunque en su mayoría, las naciones y sus gobiernos aún deben establecer los derechos y obligaciones que deben aclarar una serie de preguntas, ¿quién es el dueño del CO₂ almacenado?, ¿a quién corresponde pagar y controlar el monitoreo del CO₂ almacenado?, la importancia de dar solución a estas incógnitas es indispensable puesto que involucra responsabilidades intergeneracionales (NETL, 2017).

También es importante realizar una estimación del período de tiempo que estará almacenado el CO₂ así como comprobar que el almacenamiento será seguro durante este tiempo. Determinar como se comportara el sistema en un plazo de tiempo mediano y largo bajo diversos escenarios permitirá identificar su potencial impacto medioambiental y de seguridad permitiendo reconocer los sitios más susceptibles y propicios para la realización de estudios de caracterización económica e ingenieril con alto nivel de detalle. Para este efecto se adaptan marcos regulatorios que rigen la explotación de recursos geotérmicos e hidrocarburos (CIEMAT, 2006).

El análisis de todos los factores previamente enunciados permite al proyectista calificar la susceptibilidad de una cuenca sedimentaria para realizar almacenamiento geológico de CO₂ (Bachu, 2000). Con base en ello es posible realizar el estudio de viabilidad económica de un proyecto, analizando los costos de la captura, el transporte hasta los sitios de inyección, la compresión del gas y su disposición en profundidad. Así como los costos por tecnologías y equipos indispensables para el desarrollo del almacenamiento de CO₂ (CIEMAT, 2006)

La inversión necesaria para el desarrollo del almacenamiento geológico esta sometido directamente a costos de captura, la compresión y transporte del CO₂ hasta el emplazamiento de inyección, la profundidad de la formación almacén, la cantidad de pozos indispensables para la inyección, las estructuras civiles superficiales y sub superficiales necesarias y la gestión del proyecto. Otros parámetros que se reflejan en las evaluaciones económicas son los costos de licencia, los estudios geológicos, geofísicos y de fiabilidad requeridos en la selección de emplazamiento, su caracterización y los análisis previos al inicio del almacenamiento. Existirán variaciones según el cúmulo de información disponible, la complejidad geológica de las formaciones y los riesgos de liberación que se presenten (CIEMAT, 2006; Martínez & Nava, 2008).

Un caso de éxito en la aplicación de esta tecnología es el desarrollo del proyecto *Alberta Carbon Trunk Line (ACTL)* cuya puesta en funcionamiento total dio inicio en Junio de 2020. Este sistema captura emisiones de CO₂ industrial de la refinería North West Redwater Sturgeon y de las instalaciones fertilizadoras Nutrien Redwater. El CO₂ se comprime y envía a través de tubería la cual recorre 240 kilómetros hasta los yacimientos de gas y aceite en el sur de Alberta, donde es utilizado para fines de EOR y ser almacenado permanentemente. Esta línea de tubería puede transportar hasta 14.6 Mt de CO₂ por año, mucho más de los 1.6 Mt de CO₂ capturado por año actualmente. El costo total de la construcción del proyecto fue aproximadamente de 900 millones de dólares canadienses, de los cuales la provincia de Alberta aportó 495 millones, 63 millones del gobierno canadiense, así como la subvención de fondos, incentivos financieros que convirtieron comercialmente viable al proyecto incluyendo créditos de emisiones para reducir la responsabilidad fiscal, e ingresos por EOR (Global CCS Institute, 2020).

La factibilidad de un sitio para fungir como almacén geológico de CO₂ requiere de investigar y analizar una gran cantidad de información, situación que complica la toma de decisión por parte de un ser humano el cual corre el riesgo de involucrar el sesgo humano, ante esta situación la Inteligencia Artificial presenta una técnica que suprime esto y permite sortear este obstáculo, además permite programar en términos coloquiales sin perder precisión, la Lógica Difusa. En el capítulo siguiente se presenta esta técnica a detalle.

Capítulo II : *Lógica Difusa*

II.1 Definición y origen de la Lógica Difusa

La Lógica Difusa es una herramienta matemática que imita la forma en que el ser humano razona y procesa la información. Es un método simple, ideal para el procesamiento de información, toma de decisiones y control de procesos (Guzmán & Castaño, 2006).

La también llamada Teoría de los Conjuntos Difusos, fue iniciada por Lofti. A. Zadeh (**Figura II. 1**) en los años 60 mientras trabajaba en análisis de sistemas, Zadeh (1962) llegó a la conclusión de que las técnicas tradicionales resultaban demasiado rígidas para modelar muchos problemas complejos. En un artículo publicado en el año 1962 menciona la necesidad de una nueva técnica, que involucre un tipo de “*matemática difusa*”. En 1965 concreta sus ideas con el artículo “*Fuzzy Sets*”, en donde se presenta a la lógica difusa, como una forma en la que los datos tienen asociado un valor de membresía parcial a los conjuntos que conforman el universo de análisis; siendo este artículo considerado el comienzo de la lógica difusa. (Feltan & Caballero, 2016).

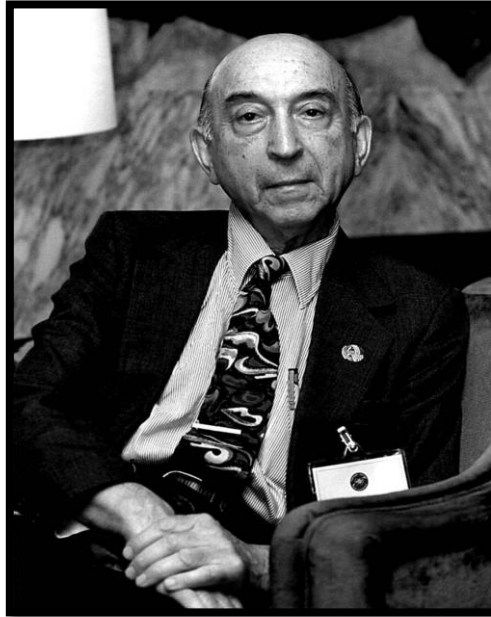


Figura II. 1. Lofti Asker Zadeh (1921 – 2017) considerado padre de la lógica difusa.

Por primera vez se aplicó esta teoría a sistemas de control a mediados de los años 70, Zadeh y plasmó estas ideas en 1972 en su artículo “*A rationale for fuzzy control*”, en 1973 sentó las bases para el desarrollo de sistemas de control basados en Lógica Difusa en su artículo “*Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision processes*” (Feltan & Caballero, 2016).

Un sistema de control difuso para una máquina de vapor fue la primer aplicación de la lógica difusa de la cual se tenga registro, sus particularidades fueron publicadas por E.H. Mamdani y S. Assilian en su artículo “*An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*” en el año de 1975. Luego, en 1980, un controlador para hornos de cemento fue desarrollado por F. L. Smith and Co en Copenhague, Dinamarca. En 1987, Hitachi y Kawasaki Heavy Industries, realizaron el sistema de control difuso de los trenes subterráneos de Sendai, Japón (**Figura II. 2**); el sistema de control difuso se configura en dos módulos, uno para el control de la velocidad y otro para la parada automática, este sistema de control difuso ha brindado importantes beneficios como una mayor comodidad para los pasajeros durante el viaje y un menor consumo de energía (Feltan & Caballero, 2016).



Figura II. 2. Tren de la línea Nanboku en Sendai Japón.

El campo de aplicación de la lógica difusa es muy extenso ya que un proceso siempre está asociado a un conocimiento, y si existe un conocimiento del proceso, es posible modelarlo mediante lógica difusa. Además la lógica difusa atenúa de manera considerable la dependencia de operadores que sustentan su conocimiento en la experiencia adquirida, el cual complicadamente podría modelarse con ecuaciones diferenciales. Los sistemas diseñados con lógica difusa son fáciles de elaborar y adecuar. Otro factor favorable es la reducción de tiempo de desarrollo y mantenimiento que la convierte en una herramienta muy relevante para su uso industrial.

Una gran variedad de productos electrónicos emplean lógica difusa. Por mencionar algunos ejemplos, la empresa Matsuhita de origen japones así como la surcoreana Samsung utilizan en sus equipos de lavado un sistema difuso de control que con base en la cantidad y tipo de suciedad así como el peso de la carga estima de forma automática el tiempo adecuado de lavado (**Figura II. 3**). En el mundo automotriz, marcas como Mitsubishi y General Motors han desarrollado exitosamente sistemas difusos para transmisión automática y control de temperatura. Uno de los sistemas de control difuso de mayor éxito es el que aún se aplica al metro de Sendai, Japón (González, 2011).



Figura II. 3. Lógica difusa aplicada en lavadoras

II.2 Conjuntos Difusos

El concepto de conjunto de manera intuitiva se entiende como una agrupación de elementos perfectamente definida, en la que es posible determinar para un elemento cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto (Morales - Luna, 2002).

Los conjuntos clásicos o booleanos, establecidos dentro de un universo de discurso, tienen una característica que al mismo tiempo se convierte en una limitante, la cual es, que cada elemento única y exclusivamente puede o no pertenecer a un conjunto, algo es totalmente verdadero o totalmente falso, no existen situaciones intermedias (Ramírez, 2008). De forma matemática un conjunto clásico se puede definir como se observa en la

.....**Ecuación II. 1.**

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases} \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 1}$$

Donde $\mu(x)$ representa el la función de pertenencia del conjunto A dentro de un universo de discurso.

Dernoncourt (2013) determina que la lógica clásica es un subconjunto de la lógica difusa. Por tanto los conjuntos difusos son una extensión de los conjuntos clásicos, donde la principal diferencia es que los conjuntos difusos asignan una valor o grado de pertenencia o membresía, valor que va de 0 a 1 considerando cualquier número real. Es posible mencionar que los conjuntos booleanos clasifican en blanco o negro mientras que los conjuntos difusos lo hacen en una escala de grises (**Figura II. 4**).

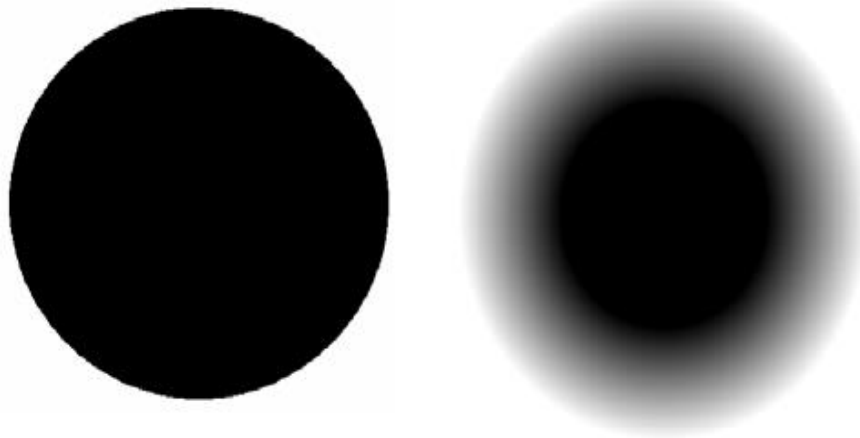


Figura II. 4. Representación grafica de un conjunto booleano (izquierda) y uno difuso (derecha) (tomado de Demoncourt, 2011).

Un conjunto difuso está albergado en un universo de discurso (U), que se define como el agregado de objetos del que se habla en un determinado contexto o situación. A cada conjunto difuso se le asocia un valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, puede entenderse como el nombre del conjunto o subconjunto. El conjunto difuso se caracteriza mediante una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el conjunto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A (González, 2011). Todos los elementos del universo de discurso van a pertenecer en cierto grado de pertenencia a todos los conjuntos del universo de discurso. De esta forma un conjunto difuso en un universo de discurso se define como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 2}$$

Ejemplificando un conjunto difuso, se presenta el caso que se establece en la **Figura II. 5**, donde el universo de discurso son las estaturas (alturas) en el intervalo 140 a 200 centímetros, es decir: $U[140, 200 \text{ cm}]$. Universo de discurso que se compone de 3

conjuntos difusos, a los cuales se les asigna un valor lingüístico [Bajo, Promedio y Alto]. De esta forma un individuo que mide 180 centímetros pertenece tanto al conjunto promedio como al conjunto alto, finalmente se interpreta de la siguiente forma: “El individuo con 180 cm de altura tiene un grado de pertenencia de 0.5 a la clase promedio y 0.5 a la clase alto”.

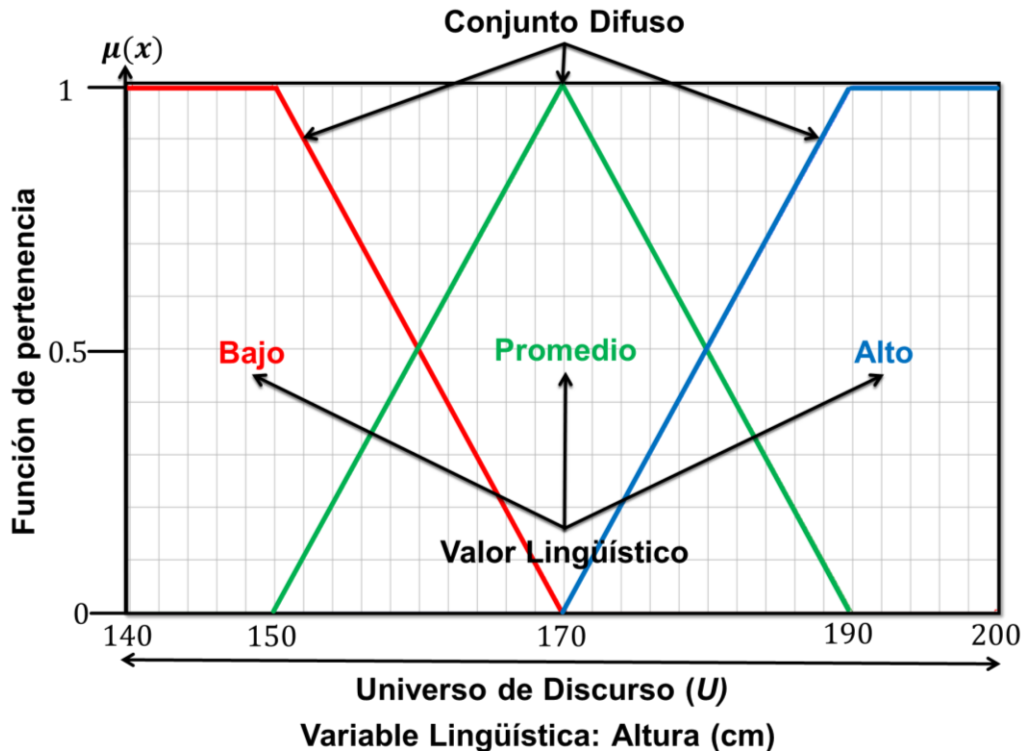


Figura II. 5. Elementos de los conjuntos difusos.

Previamente se menciona que cada conjunto difuso se le asigna una etiqueta lingüística con palabras o sentencias en un lenguaje natural o artificial. De esta forma, una variable lingüística sirve para representar cualquier elemento que sea demasiado complejo, o del cual no se tenga una definición concreta; es decir; lo que no se puede explicar en términos numéricos (Diciembre, 2017). Nominalmente se le asocian una quintupla de variables expresadas de la siguiente forma:

$$X, T(X), U, G, M \dots \dots \dots \text{Ecuación II. 3}$$

Donde cada variable implica lo siguiente:

- X : el nombre de la variable.
- $T(X)$: el conjunto de términos de X , es decir, el agregado de sus valores lingüísticos (o etiquetas lingüísticas)
- U es el universo del discurso (o dominio subyacente). Por ejemplo, tomando como referencia una temperatura “cálida” o “aproximadamente 25°C”, el dominio subyacente es un dominio numérico (los grados centígrados).
- G es una gramática libre de contexto mediante la que se generan términos en $T(X)$, como podrían ser “muy alto”, “no muy bajo”,...
- M es una regla semántica que asocia a cada valor lingüístico de X su significado $M(X)$ que denota un conjunto difuso en U

De manera indirecta se ha podido apreciar que diversos conceptos de teoría clásica de conjuntos pueden ser aplicables a conjuntos difusos, otros son exclusivos e inherentes a la teoría de conjuntos difusos. De manera más detallada se pueden enlistar una serie de principios de lógica clásica aplicados a la lógica difusa, estos son (Másmela, 2015):

- El soporte de un conjunto difuso A en el universo de discurso U es un conjunto que contienen todos los elementos de U que tienen un valor de pertenencia distinto de cero en A , esto es,

$$\text{sup}(X) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 4}$$

Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento se tiene un conjunto difuso en un solo punto lo que se conoce como “singleton” difuso.

- El conjunto vacío, corresponde al conjunto difuso cuya función de pertenencia es la función nula es decir,

$$\mu_\phi(x) = 0, \forall x \in U \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 5}$$

- El punto de cruce de un conjunto difuso es el punto U cuyo valor de pertenencia es igual a 0.5.
- Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si sus funciones características $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ son iguales.

$$\mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in U \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 6}$$

- El conjunto difuso B contiene al conjunto difuso A , esto es $A \subset B$, si y sólo si sus funciones características $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ son iguales.

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in U \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 7}$$

- Un conjunto difuso A definido en U se denomina normal si y solo si:

$$\max_{x \in U} \mu_A(x) = 1 \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 8}$$

- Un conjunto difuso convexo es el conjunto en el que la función de pertenencia monótonamente incrementa o decrece. Precisamente, la función de membresía (i) monótonamente incremente, o (ii) monótonamente decrece, o (iii) monótonamente incremente y decrece con valores incrementales de ellos elementos del universo. Para cada número real, se dice que x_1, x_2 y x_3 , con $x_1 < x_2 < x_3$.

$$\mu_A(x_2) \geq \min\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_3)\} \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación II. 9}$$

Se ha establecido la importancia de las funciones de membresía debido a que indican una medida del grado de semejanza de un elemento de U con el conjunto difuso. El tipo de función de membresía por aplicar dependerá del principio aplicado en la resolución de problemas y debe tomar en cuenta aspectos culturales, geográficos, de época y el punto de vista del usuario. La única condición que una función de membresía debe cumplir es que los valores oscilen entre valores de 0 y 1, con continuidad. Los tipos de funciones de

membresía características más comúnmente utilizadas por sus simplicidad matemática y su manejabilidad son (Másmela, 2015):

a) Triangular

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x - a}{m - a} & \text{para } a < x \leq m \\ \frac{b - x}{b - m} & \text{para } m < x \leq b \\ 0 & \text{para } x > b \end{cases}$$

Gráficamente se aprecia en la **Figura II. 6**:

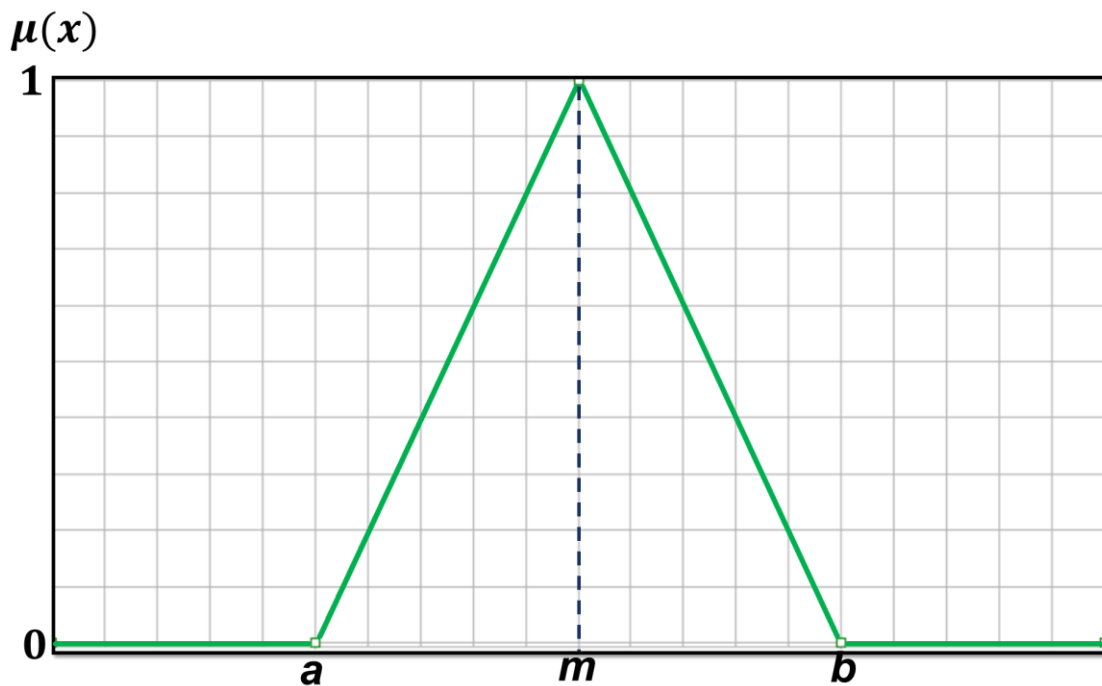


Figura II. 6. Función de membresía triangular para un conjunto difuso.

b) Trapezoidal

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{d-x}{b-c} & \text{para } a < x \leq b \\ 1 & \text{para } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{b-c} & \text{para } a < x \leq b \\ 0 & \text{para } x > d \end{cases}$$

Gráficamente se aprecia en la **Figura II. 7**:

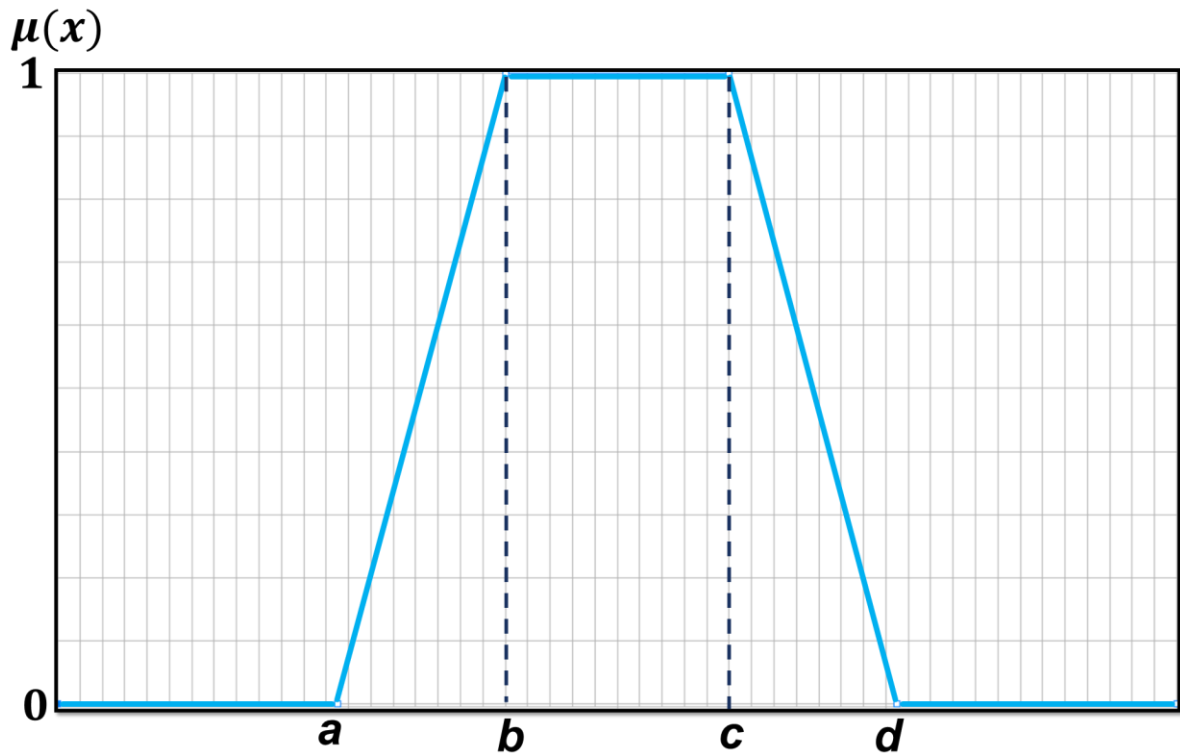


Figura II. 7 Función de membresía trapezoidal para un conjunto difuso

c) Gaussiana

$$\mu_A(x) = ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{2c^2}}$$

a es una constante real

*x_0 es una constante real
que determina el centro*

*c es una constante real
que determina el ancho*

Gráficamente se aprecia en la **Figura II. 8.**

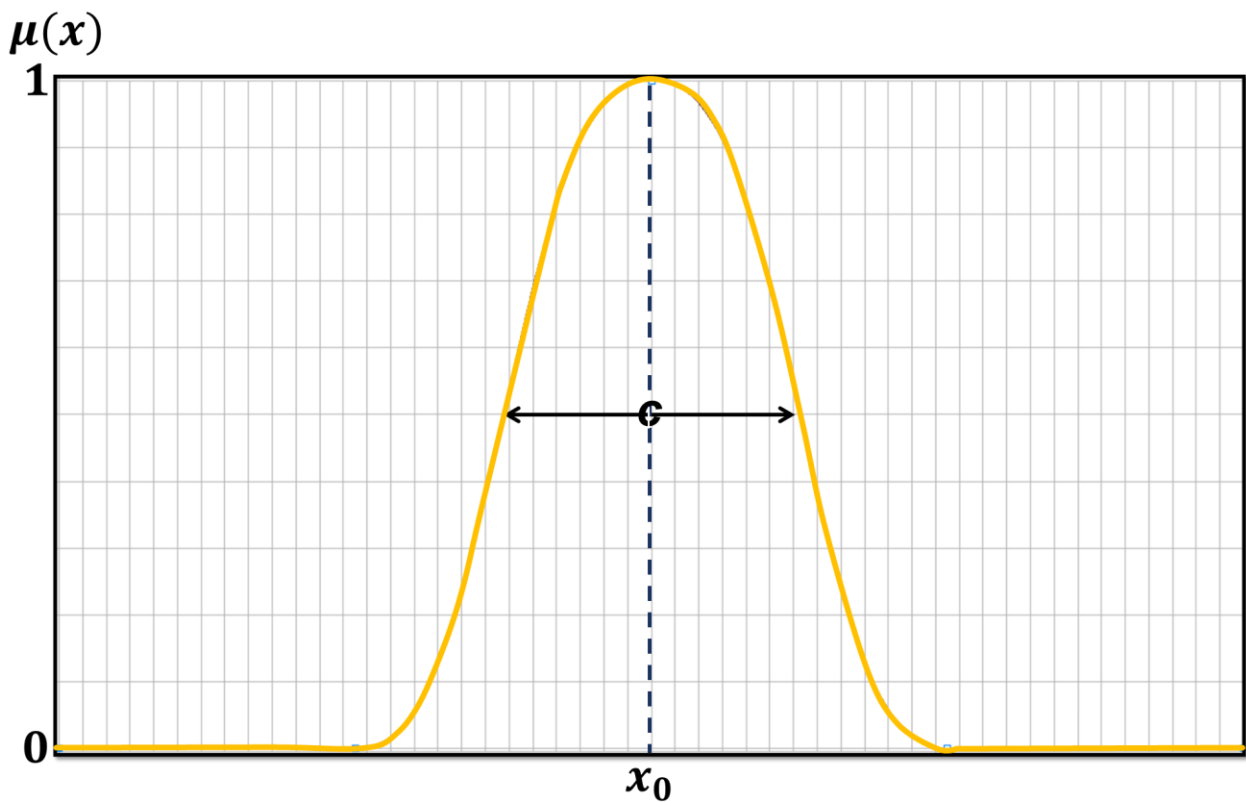


Figura II. 8. Función de membresía gaussiana para un conjunto difuso.

d) Sigmoidal.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ 2 \left[\frac{x-a}{m-a} \right]^2 & \text{para } a < x \leq m \\ 1 - 2 \left[\frac{b-x}{b-m} \right]^2 & \text{para } m < x < b \\ 1 & \text{para } x \geq b \end{cases}$$

Gráficamente se aprecia en **Figura II. 9**.

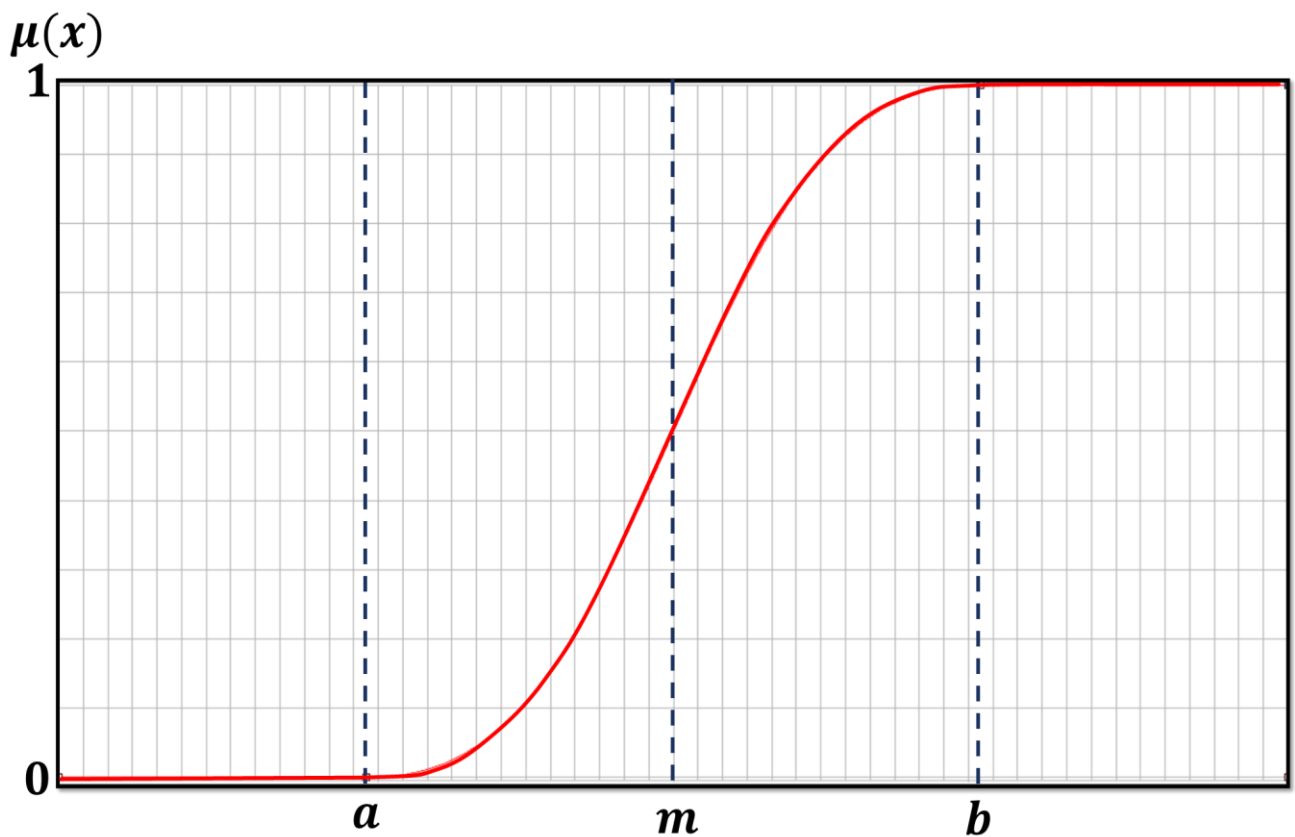


Figura II. 9. Función de membresía gaussiana para un conjunto difuso.

- e) Singleton, que es la función que se asocia a los conjuntos clásicos ya que posee las siguientes características.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$$

Gráficamente se aprecia en la **Figura II. 10**.

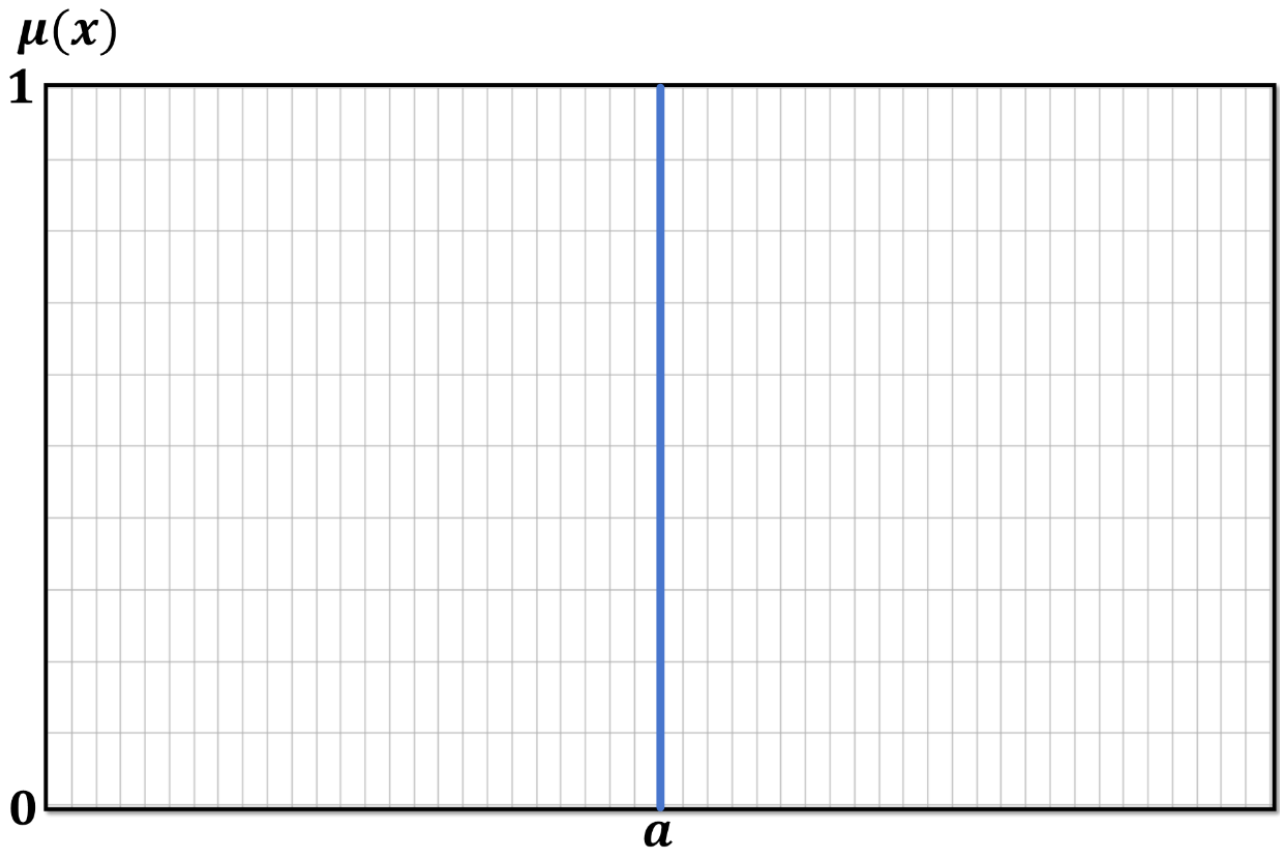


Figura II. 10 Función de membresía singleton para un conjunto difuso.

II.2.1 Operaciones con Conjuntos Difusos.

Existen tres operaciones básicas de conjuntos convencionales que pueden generalizarse de diversas formas en conjuntos difusos: complemento, unión e intersección. Esto es posible solo si se restringe el rango de membresía al conjunto $[0,1]$, lo cual permite que estas operaciones fundamentales sobre los conjuntos difusos se comporten de manera similar a las operaciones sobre conjuntos convencionales. Tales operaciones para conjuntos difusos pueden ser analizables desde el punto de vista de los operadores de Zadeh o probabilístico (Dernoncourt, 2013), como se observa en la **Tabla II. 1**.

Tabla II. 1 Operadores para Conjuntos Difusos.

	Intersección (AND) $\mu_{A \cap B}$	Unión (OR) $\mu_{A \cup B}$	Complemento (NOT) $\mu_{\bar{A}}(x)$
Operadores de Zadeh MIN/MAX	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabilístico PROD/PROBOR	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

La **Figura II. 11** ilustran gráficamente las operaciones con base en los operadores de Zadeh.

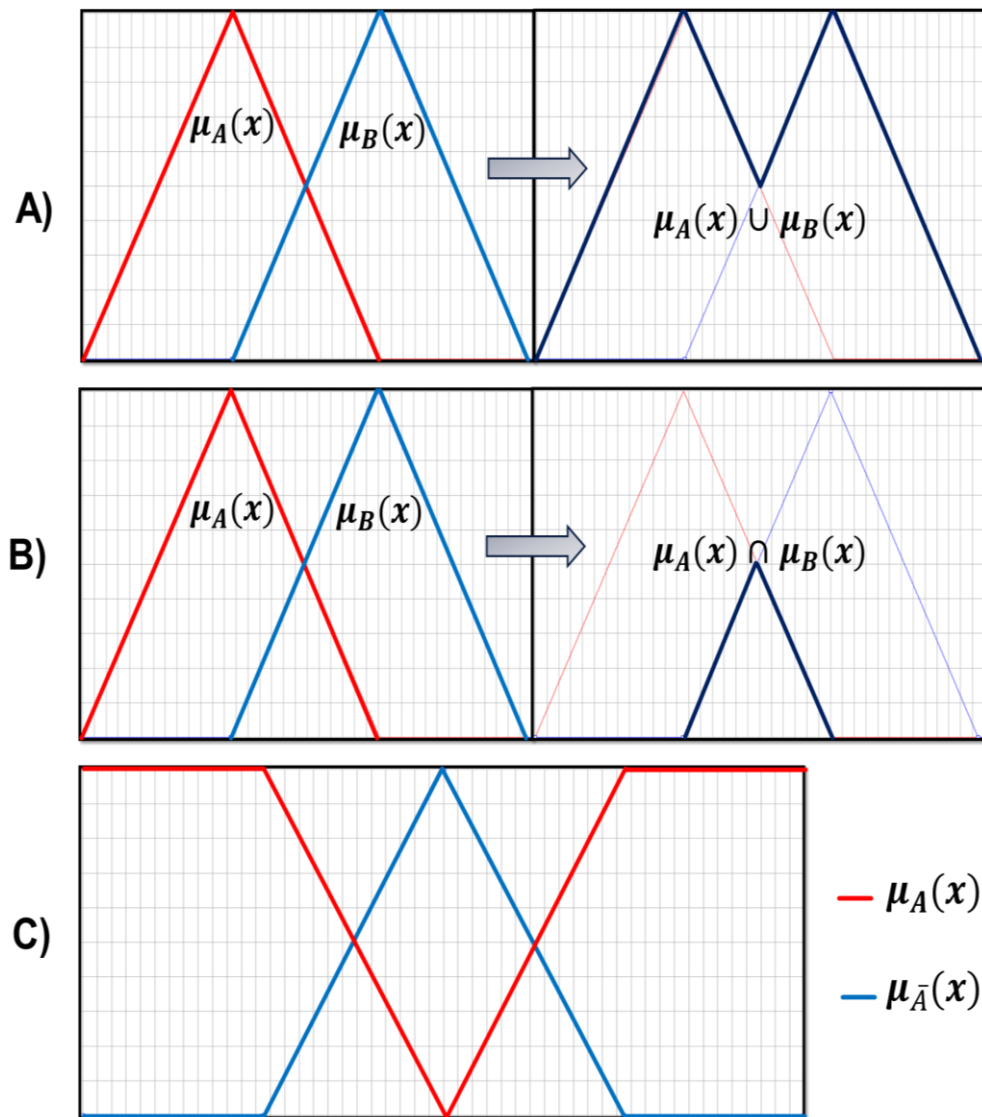


Figura II. 11. Operadores de Zadeh para A) Unión, B) Intersección y C) Complemento.

Estas operaciones con conjuntos difusos, cumplen con las propiedades de conjuntos clásicos: asociatividad, conmutatividad y distributividad así como las leyes de Morgan. Sin embargo, también hay que destacar que existe una propiedad fundamental de la teoría clásica de conjuntos que no se cumple en la teoría de conjuntos difusos, dicha propiedad es la de complementariedad. Estas propiedades se resumen en la **Tabla II. 2**.

Tabla II. 2 Propiedades de los conjuntos difusos (Parte 1)

Propiedad	Unión	Intersección
Conmutativa	$A \cup B = B \cup A$ $\max(\mu_A, \mu_B) = \max(\mu_B, \mu_A)$	$A \cap B = B \cap A$ $\min(\mu_A, \mu_B) = \min(\mu_B, \mu_A)$
Asociativa	$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $\max(\mu_A, \max(\mu_B, \mu_C))$ $= \max(\mu_A, \mu_B, \mu_C)$ $= \max(\max(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$	$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$ $\min(\mu_A, \min(\mu_B, \mu_C))$ $= \min(\mu_A, \mu_B, \mu_C)$ $= \min(\min(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$
Identidad	$A \cup \phi = A$ $\max(\mu_A, 0) = \mu_A$	$A \cap \phi = A$ $\min(\mu_A, 0) = \mu_A$
Transitiva	<p><i>Si $A \subseteq B$ y $B \subseteq C$ entonces $A \subseteq C$</i></p> <p><i>Si $\mu_A \leq \mu_B$ y $\mu_B \leq \mu_C$ entonces $\mu_A \leq \mu_C$</i></p>	<p><i>Si $A \subseteq B$ y $B \subseteq C$ entonces $A \subseteq C$</i></p> <p><i>Si $\mu_A \leq \mu_B$ y $\mu_B \leq \mu_C$ entonces $\mu_A \leq \mu_C$</i></p>
Distributiva	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $\max(\mu_A, \min(\mu_B, \mu_C))$ $= \min(\max(\mu_A, \mu_B), \max(\mu_A, \mu_C))$ <p><i>Si $\mu_A \geq \mu_B$ y $\mu_A \geq \mu_C$ entonces $\mu_A = \mu_A$</i></p> <p><i>Si $\mu_A \leq \mu_B$ y $\mu_A \leq \mu_C$ entonces $\min(\mu_B, \mu_C) = \min(\mu_B, \mu_C)$</i></p> <p><i>Si $\mu_B \geq \mu_A \geq \mu_C$ ó $\mu_C \geq \mu_A \geq \mu_B$ entonces $\mu_A = \mu_A$</i></p>	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $\min(\mu_A, \max(\mu_B, \mu_C))$ $= \max(\min(\mu_A, \mu_B), \min(\mu_A, \mu_C))$ <p><i>Si $\mu_A < \mu_B$ y $\mu_A < \mu_C$ entonces $\mu_A = \mu_A$</i></p> <p><i>Si $\mu_A > \mu_B$ y $\mu_A > \mu_C$ entonces $\max(\mu_B, \mu_C) = \max(\mu_B, \mu_C)$</i></p> <p><i>Si $\mu_B \geq \mu_A \geq \mu_C$ y $\mu_A \geq \mu_C$ ó $\mu_C \geq \mu_A \geq \mu_B$ entonces $\mu_A = \mu_A$</i></p>

Tabla II. 3 Propiedades de los conjuntos difusos (Parte 2).

Propiedad	Unión	Intersección
Idempotencia	$A \cup A = A$ $\max(\mu_A, \mu_A) = \mu_A$	$A \cap A = A$ $\min(\mu_A, \mu_A) = \mu_A$
Involutiva	$\bar{\bar{A}} = A$ $\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - (1 - \mu_A)$ $= \mu_A$	$\bar{\bar{A}} = A$ $\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - (1 - \mu_A)$ $= \mu_A$
Complementaria (No se cumple para conjuntos difusos)	$A \cup \bar{A} = X; X \text{ es el universo de discurso}$ $\max(\mu_A, 1 - \mu_A) \neq 1$	$A \cap \bar{A} = \phi$ $\min(\mu_A, 1 - \mu_A) \neq 0$
Leyes de Morgan	$\overline{A \cup B} = \bar{B} \cap \bar{A}$ $1 - \max(\mu_A, \mu_B)$ $= \min(1 - \mu_A, 1 - \mu_B)$ <i>Si $\mu_A = \mu_B$ entonces $1 - \mu_A$</i> $= 1 - \mu_A \text{ ó } 1 - \mu_B$ $= 1 - \mu_B$ <i>Si $\mu_A > \mu_B$ entonces $1 - \mu_A$</i> $= 1 - \mu_A$ <i>Si $\mu_A < \mu_B$ entonces $1 - \mu_B$</i> $= 1 - \mu_B$	$\overline{A \cap B} = \bar{B} \cup \bar{A}$ $1 - \min(\mu_A, \mu_B)$ $= \max(1 - \mu_A, 1 - \mu_B)$ <i>Si $\mu_A = \mu_B$ entonces $1 - \mu_A$</i> $= 1 - \mu_A \text{ ó } 1 - \mu_B$ $= 1 - \mu_B$ <i>Si $\mu_A > \mu_B$ entonces $1 - \mu_B$</i> $= 1 - \mu_B$ <i>Si $\mu_A < \mu_B$ entonces $1 - \mu_A$</i> $= 1 - \mu_A$

II.3 Controlador Difuso

Los controladores difusos fueron introducidos por Mamdani en 1974 y por Mamdani & Assilian en 1975 para el control de procesos complejos, como el de plantas industriales, especialmente cuando no hay un modelo preciso del proceso que se quiere controlar (Aizemberg, 1997). Un sistema de control difuso labora de forma muy distinta a los sistemas de control convencionales. Estos utilizan el razonamiento experto para generar una base de conocimientos que dotará al sistema la habilidad de discernir sobre ciertas acciones que se presentan en su funcionamiento. Los sistemas de control difuso son capaces de describir un conjunto de reglas a semejanza de las que utilizaría una persona para controlar un proceso y con base en estas reglas generar acciones de control. La aplicación de un controlador difuso va desde sistemas poco complejos hasta sistemas cuyos modelos matemáticos involucren de conocimientos complicados (Ramírez, 2008).

Un controlador difuso se estructura como se muestra en la **Figura II. 12**.

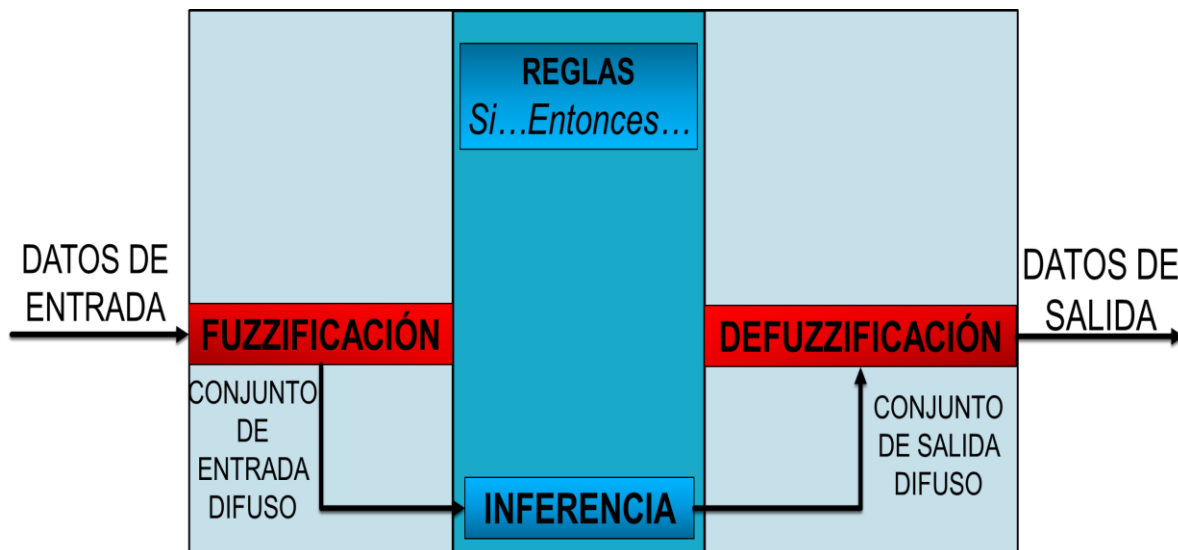


Figura II. 12. Estructura de un controlador difuso (modificado de Ramírez, 2008).

De manera global las **Figura II. 13**, **Figura II. 14** y **Figura II. 15**. ilustran el proceso de funcionamiento de un sistema difuso, en este ejemplo la etapa de inferencia se aplica el método de Mamdani y para el proceso de defuzzificación se utiliza el método de centro de gravedad de

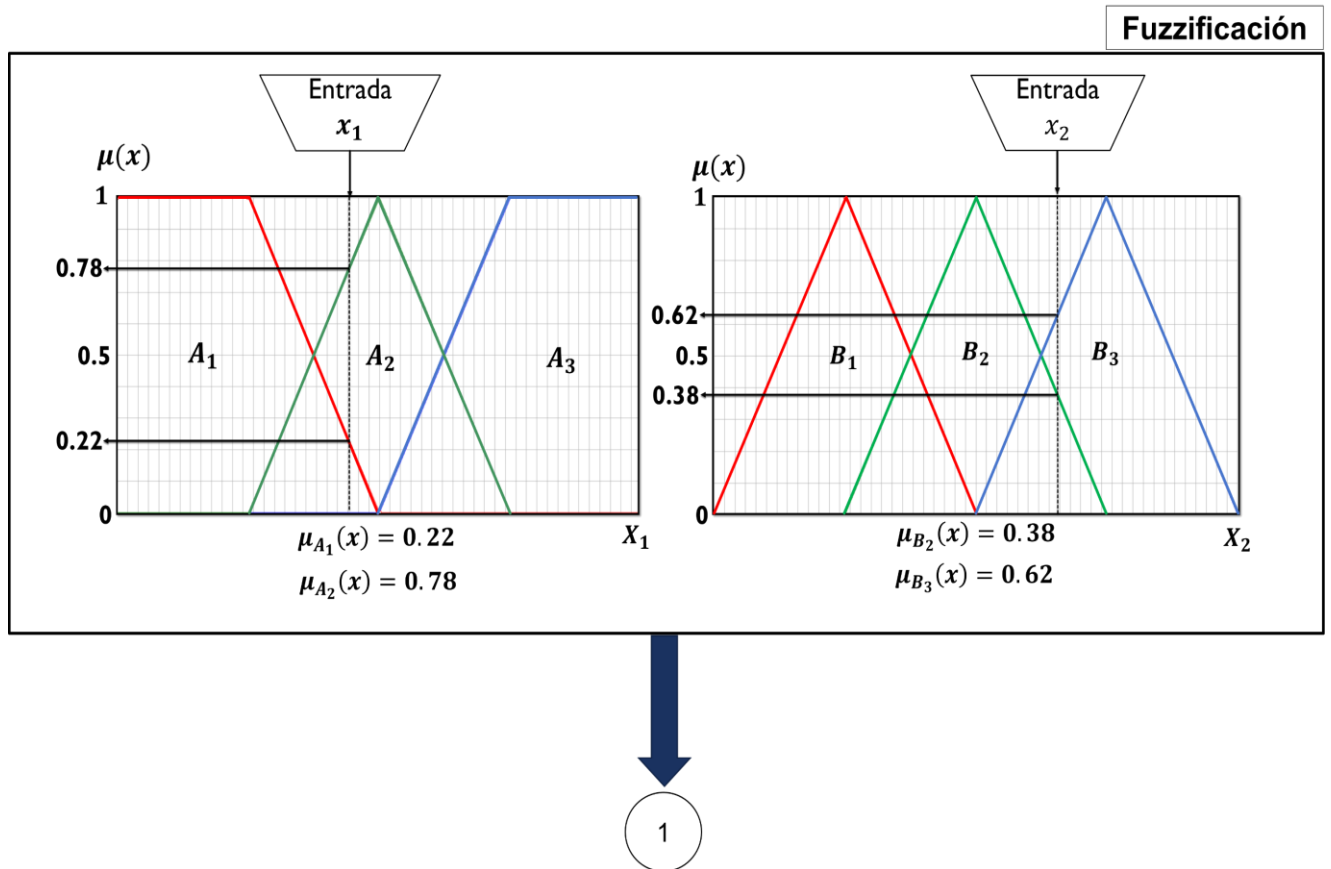


Figura II. 13. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de fuzzificación (modificado de González, 2011).

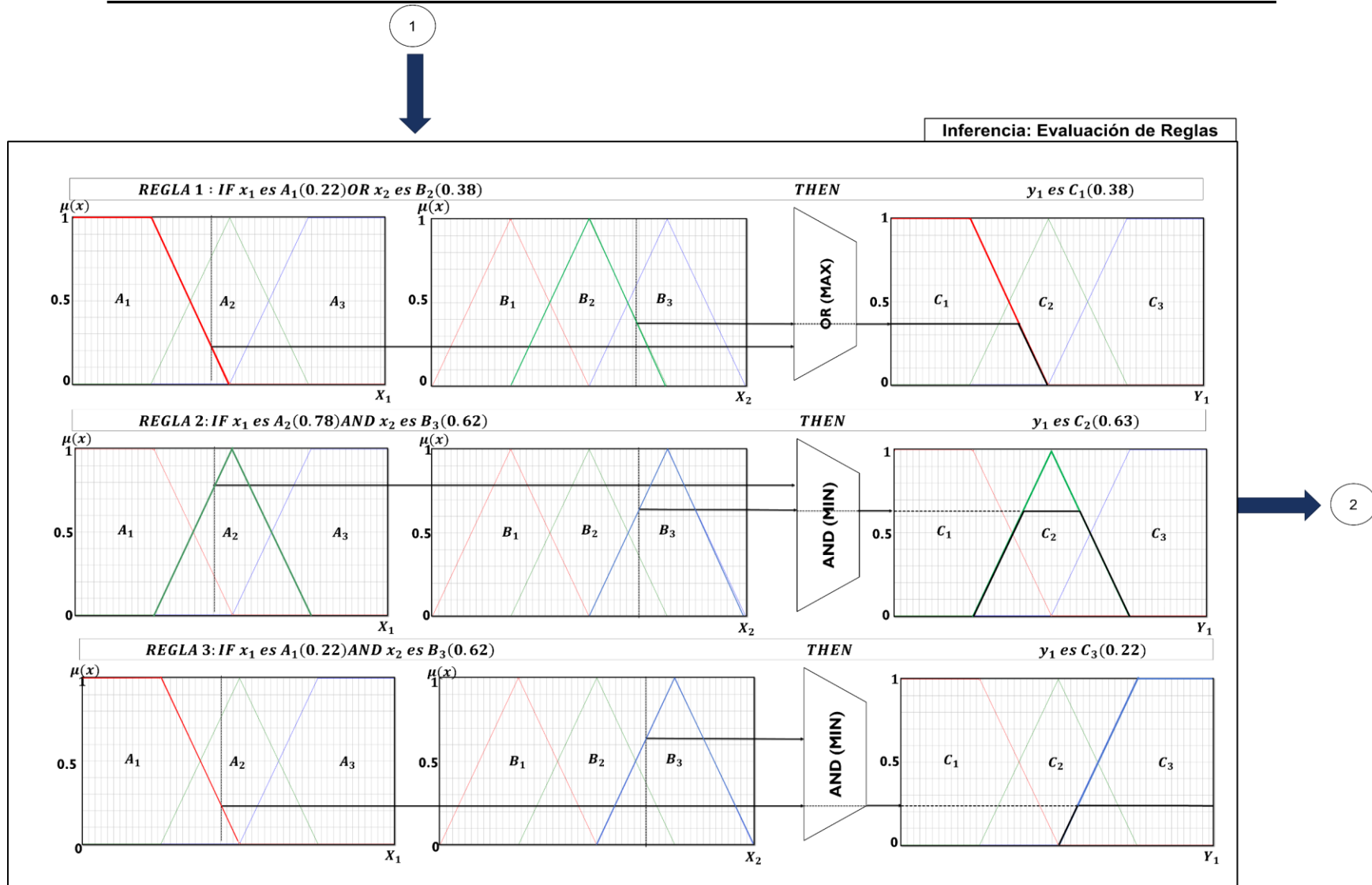


Figura II. 14. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de inferencia: Evaluación de reglas (modificado de González, 2011).

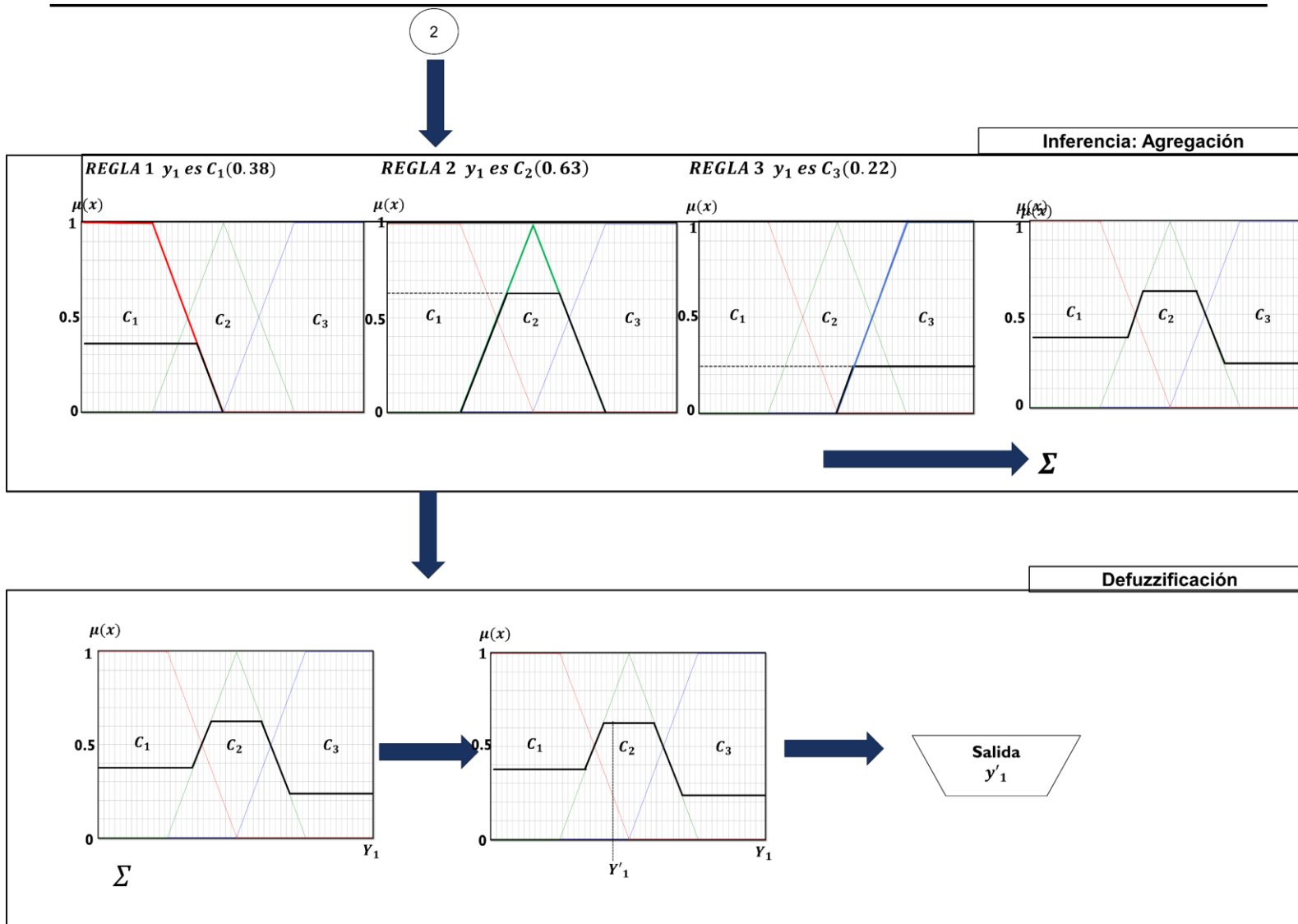


Figura II. 15. Esquema de control difuso con método de Inferencia de Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad, Etapa de inferencia: Agregación y Defuzzificación (modificado de González, 2011).

En las subsecciones siguientes se desarrolla de manera detallada cada una de las etapas de un sistema difuso.

II.3.1 Fuzzificación

Este proceso se efectúa en todo instante de tiempo, es la puerta de admisión al sistema de inferencia difusa. Es un método matemático que transforma a un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece (Ramírez, 2008).

Para ejemplificar, retomando la variable lingüística de entrada altura y tres conjuntos difusos asociados: Bajo, Promedio, Alto. Se requiere fuzzificar la variable de entrada Altura cuando su valor es de 178 centímetros, para ello dicho valor se representa en el gráfico de los conjuntos difusos y se obtiene el grado de membresía que tiene a cada uno de ellos. Se observa que el valor de $\text{Altura} = 178$ centímetros tiene un grado de membresía de 0.6 al conjunto difuso *Promedio* y de 0.4 al conjunto difuso *Alto* (**Figura II. 16**).

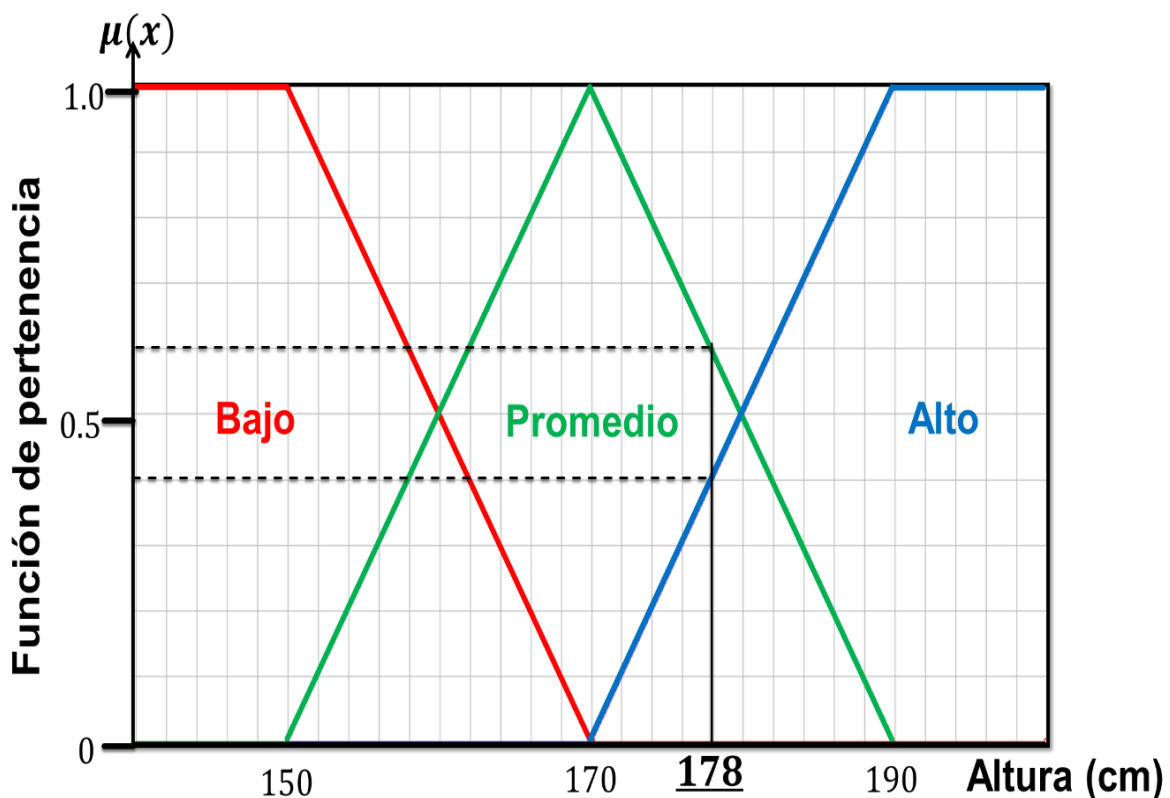


Figura II. 16. Ejemplo de fuzzificación.

II.3.2 Inferencia

Los sistemas de inferencia son el bloque por medio del cual los mecanismos de inferencia relacionan los conjuntos difusos de entrada y salida simulando el proceso de decisión humano. Tanto las entradas como las salidas a este bloque son conjuntos difusos (Calzada, 2015).

Se han desarrollado diferentes sistemas de inferencia, los cuales están en continua investigación y mejora. La diferencia básica es la forma en que los grados de membresía influyen en las reglas de inferencia difusas (Vicent, 2014). El corazón de la inferencia es la evaluación de las reglas y la agregación, para ello se analizarán dos modelos de inferencia el de Mamdani y el TSK (Takagi, Sugeno y Kang).

A) Inferencia de Mamdani

Se considera el método de mayor aplicación, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975. Este método requiere primordialmente de la fuzzificación, una vez realizado esto, se recurre a la evaluación de reglas. Las reglas tienen la característica de ser *IF... THEN...*, donde la parte *IF* son los antecedentes y la parte *THEN* la consecuencia o resultado. Si una regla tiene múltiples antecedentes, se deben utilizar los operadores para conjuntos difusos Y (AND) u O (OR) para obtener un único valor que represente el resultado de la evaluación. Este número (el valor de verdad) se aplica al consecuente.

Para evaluar la disyunción (operador OR) habitualmente se emplea la T-Conorma estándar (máximo), definida como hemos visto como ya se ha presentado: $\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$. De igual forma, para el AND se usa habitualmente la T-Norma estándar del mínimo: $\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B)$.

El resultado de la evaluación del antecedente se aplica al consecuente, aplicando un recorte o escalado según el valor de verdad, el grado de pertenencia del antecedente (**Figura II. 17**). El método más comúnmente utilizado es el recorte (clipping) que corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente. El escalado proporciona un valor más preciso, preservando la forma original del

conjunto difuso. Se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente (González, 2011).

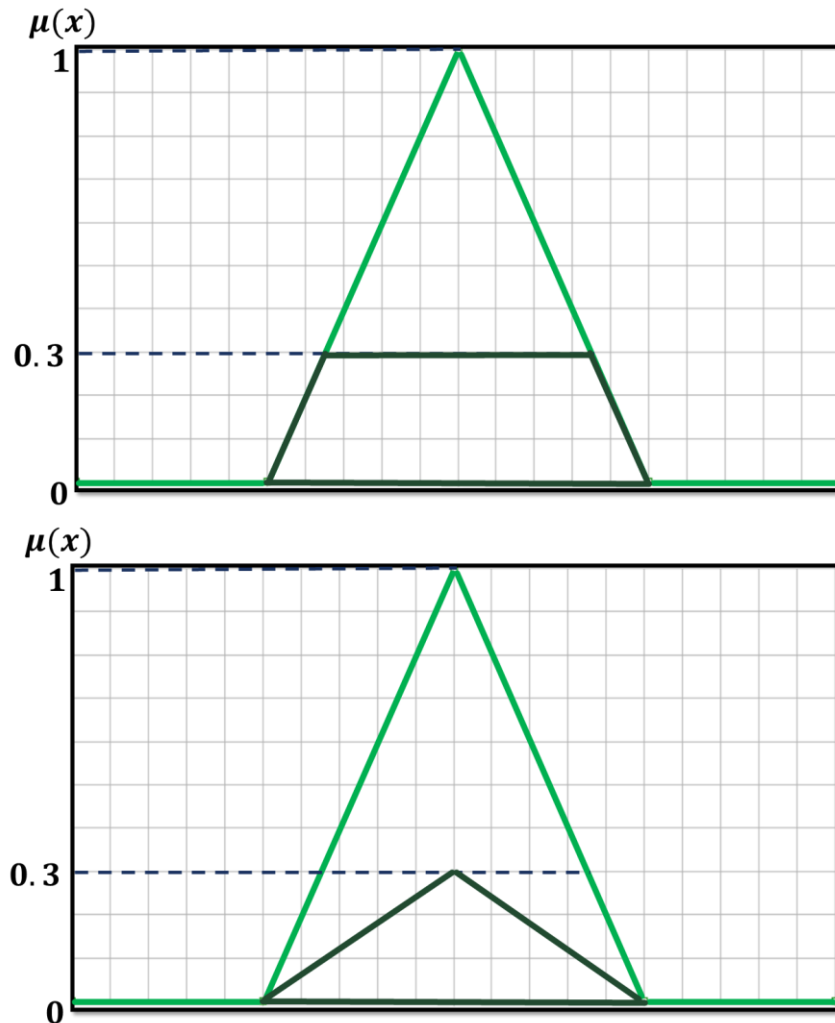


Figura II. 17. Conjunto recortado (superior) y conjunto escalado (inferior)

Al finalizar la evaluación de todas las reglas se procede a la agregación, proceso de adición de las salidas de todas las reglas; es decir, se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes previamente recortados o escalados, combinando para obtener un único conjunto difuso para cada variable de salida, y este finalmente pueda ser sujeto a la etapa de defuzzificación. La ventaja del modelo de inferencia de Mamdani es que es intuitivo, tiene una amplia aceptación y está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia. (Pérez, 2005).

B) Inferencia TSK

Bajo el análisis de (González, 2011), el modelo de inferencia de Mamdani requiere necesariamente de un método de defuzzificación. Desde el punto de vista computacional este método no es muy eficiente. En este modelo se puede reducir el tiempo de inferencia aplicando una función matemática al consecuente, de forma que el formato general de las reglas con este modelo de inferencia TSK es:

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } f(x, y) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 10}$$

Este tipo de método proporciona mayor eficiencia, pero no presenta un marco tan natural para la representación del conocimiento humano. Un tipo habitual de representación consecuente, que toma valor uno en un valor puntual del universo de discurso y cero en cualquier otro punto.

Empleando este tipo de aproximación (ampliamente utilizada), la inferencia TSK y de Mamdani son muy parecidas, tomando las reglas el siguiente formato:

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } k \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 11}$$

Siendo k un valor constante para el singleton. La salida numérica (“crisp”) en este caso se obtiene mediante una sencilla agregación (media de pesos W_A) de estos singletons.

$$W_A = \frac{\sum(\mu(k_i) \times k_i)}{\sum\mu(k_i)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 12}$$

En general el método de Mamdani se utiliza ampliamente porque apareció antes, y se presta más a la representación de conocimiento experto. Permite describir el conocimiento experto de una forma intuitiva. El principal inconveniente es su alto coste computacional, por lo que para aplicaciones de control y problemas de optimización se emplea más frecuentemente el método de inferencia TSK.

II.3.3 Defuzzificación

La defuzzificación realiza el proceso de transformar los valores difusos generados en la inferencia en valores numéricos (salida crisp), que posteriormente se utilizara en el proceso de control (Ramírez, 2008). En general, existen varios métodos para implementar la defuzzificación de un conjunto difuso A de un universo de discurso X. Usualmente este conjunto, se representa mediante una función de membresía agrupada. A continuación se presentan algunos de los métodos de defuzzificación de mayor aplicación para el método de inferencia de Mamdani (López 2002).

A) Centro de Área (CoA) / Centro de Gravedad (CoG)

El método de defuzzificación comúnmente utilizado en los sistemas de tipo Mamdani es el centro de gravedad o centro de área, que determina el valor representativo de un conjunto difuso como el centro del área limitada por el conjunto difuso resultante de aplicar las diferentes reglas. En aplicaciones prácticas se utiliza la versión discreta que puede ser interpretada como una suma de Riemann con funciones de membresía discretas.

$$CoA \quad \hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 13}$$

Donde x_i indica el elemento de muestra, $\mu_A(x_i)$, es la función de membresía, y n representa el número de elementos en la muestra. Para funciones de membresía continuas, \hat{x} , se define como:

$$CoA \quad \hat{x} = \frac{\int x \cdot \mu_A(x) dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 14}$$

Entre las propiedades positivas de este método hay que destacar que es continuo (un pequeño cambio en las entradas no implica un cambio brusco en las salidas) y no-ambiguo (obtiene un valor único como resultado de la defuzzificación). Este método introduce no linealidad en el controlador aunque las reglas sean lineales. La necesidad de recorrer todo el universo de discurso para evaluar el centroide es la principal limitación de este método desde el punto de vista de su implementación. Resulta importante ejemplificar este método debido a que es al que se recurre para el desarrollo del sistema

difuso propuesto en este trabajo. Para ello se toma como referencia el ejemplo presentado por Samanta (2018), en donde se tiene la región obtenida de la agregación de reglas de los conjuntos difusos A_1 y A_2 (**Figura II. 18**).

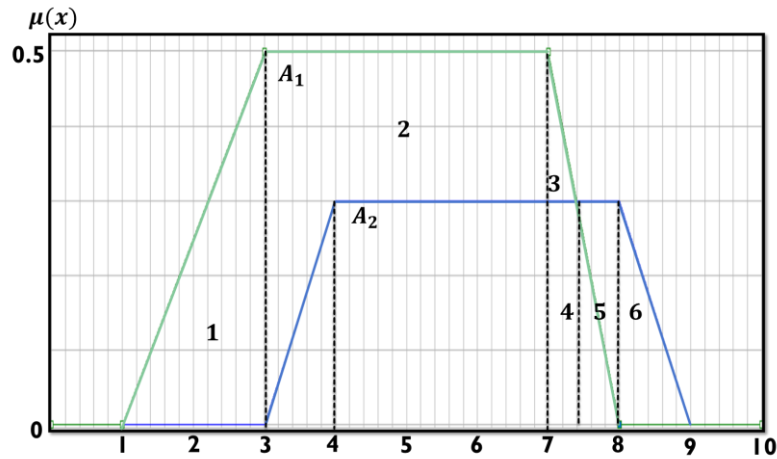


Figura II. 18. Área por defuzzificar tomada del ejemplo presentado por Samanta (2018).

Aplicando el método de CoG, el valor defuzzificado de \hat{x} se define de la siguiente forma:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

En este caso n indica el número de sub-áreas, A_i y x_i representa el área y el área del centroide, respectivamente, de cada i -sub área.

Es fácil de apreciar que el área obtenida de la agregación se encuentra dividida en seis sub-áreas. Para obtener el valor defuzzificado, primeramente se obtiene el área de cada subárea, dando como resultado lo siguiente:

$$\text{Sub área 1} = \frac{2 \times 0.5}{2} = 0.5$$

$$\text{Sub área 4} = 0.5 \times (0.5 - 0.2) = .15$$

$$\text{Sub área 2} = (7 - 3) \times 0.5 = 2$$

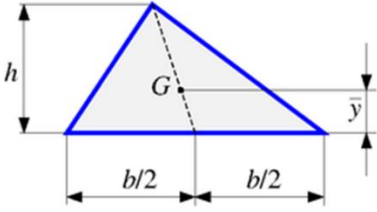
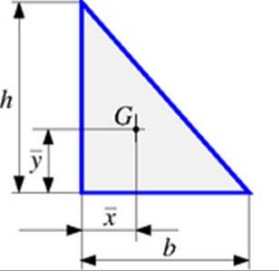
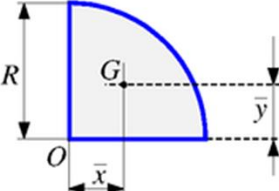
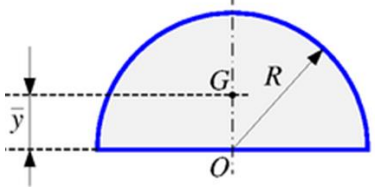
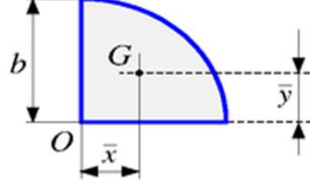
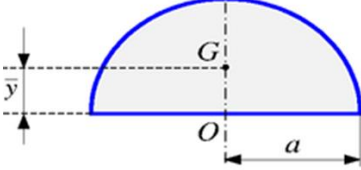
$$\text{Sub área 5} = 0.5 \times (0.5 - 0.2) = .15$$

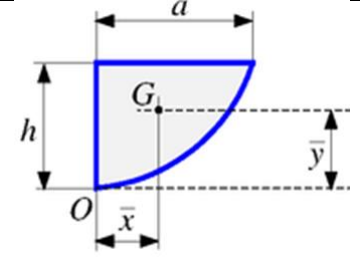
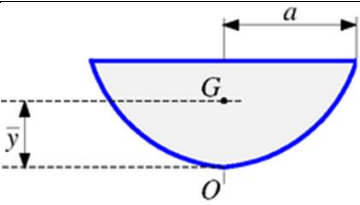
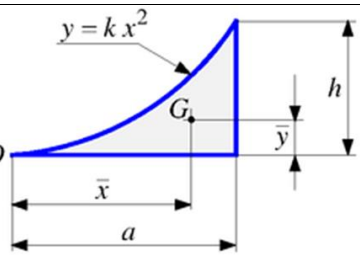
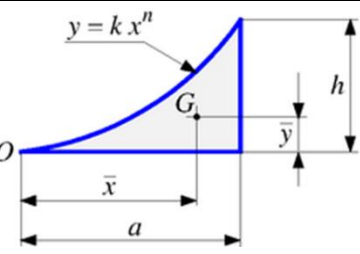
$$\text{Sub área 3} = \frac{(7 - 3) \times (0.5 - 0.3)}{2} = .05$$

$$\text{Sub área 6} = \frac{1 \times 0.3}{2} = .15$$

Enseguida es necesario calcular el centro de gravedad de cada subárea, para ello se presenta la **Tabla II. 4**.

Tabla II. 4 Tabla de centroides tomada de Rodríguez (2018)

Forma	Figura	\bar{x}	\bar{y}	Área
Triángulo			$\frac{h}{3}$	$\frac{bh}{2}$
Triángulo rectángulo		$\frac{b}{3}$	$\frac{h}{3}$	$\frac{bh}{2}$
Cuarto de círculo		$\frac{4R}{3\pi}$	$\frac{4R}{3\pi}$	$\frac{\pi R^2}{4}$
Semicírculo		0	$\frac{4R}{3\pi}$	$\frac{\pi R^2}{2}$
Cuarto de elipse		$\frac{4a}{3\pi}$	$\frac{4b}{3\pi}$	$\frac{\pi ab}{2}$
Semi-elipse		0	$\frac{4b}{3\pi}$	$\frac{\pi ab}{2}$

<p>Semi parábola</p>		$\frac{3a}{8}$	$\frac{3h}{5}$	$\frac{2ah}{3}$
<p>Parábola</p>		0	$\frac{3h}{5}$	$\frac{4ah}{3}$
<p>Seno parabólico</p>		$\frac{3a}{4}$	$\frac{3h}{10}$	$\frac{ah}{3}$
<p>Seno genérico</p>		$\left(\frac{n+1}{n+2}\right)a$	$\left(\frac{n+1}{4n+2}\right)h$	$\frac{ah}{n+1}$

Con el apoyo de está tabla se obtienen los centroides con respecto a la salida es decir al eje x:

$$\text{Sub área 1} = 3 - \frac{2}{3} = 2.333$$

$$\text{Sub área 4} = \frac{0.5}{2} + 7 = 7.25$$

$$\text{Sub área 2} = \frac{4}{2} + 3 = 5$$

$$\text{Sub área 5} = \frac{0.5}{2} + 7.5 = 7.75$$

$$\text{Sub área 3} = \frac{0.5}{3} + 7 = 7.166$$

$$\text{Sub área 6} = \frac{1}{3} + 8 = 8.333$$

Una vez calculados las sub áreas y su respectivo centroide se puede obtener el valor defuzzificado:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{(0.5 \times 2.333) + (2 \times 5) + (.05 \times 7.166) + (.15 \times 7.25) + (.15 \times 7.75) + (.15 \times 8.333)}{(0.5 + 2 + .05 + .15 + .15 + .15)} = 5.008$$

B) Centro de Sumas (CoS)

A diferencia del método anterior, el objetivo del centro de sumas es contemplar la contribución de cada una de las conclusiones parciales. Para ello utiliza la suma en lugar del máximo como operador de agregación de reglas con lo que las áreas que se superponen se reflejan en el resultado. Formalmente, en el caso discreto, se expresa:

$$CoS \quad \hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{r=1}^R \mu_A^r(x_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \mu_A^r(x_i)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 15}$$

La mayoría del software para sistemas difusos implementa este algoritmo en lugar del centro de área debido a que es más rápido.

Para ejemplificar este método de nuevo se toma el ejemplo propuesto por Samanta (2018), en donde el área por defuzzificar se presenta en la **Figura II. 19**.

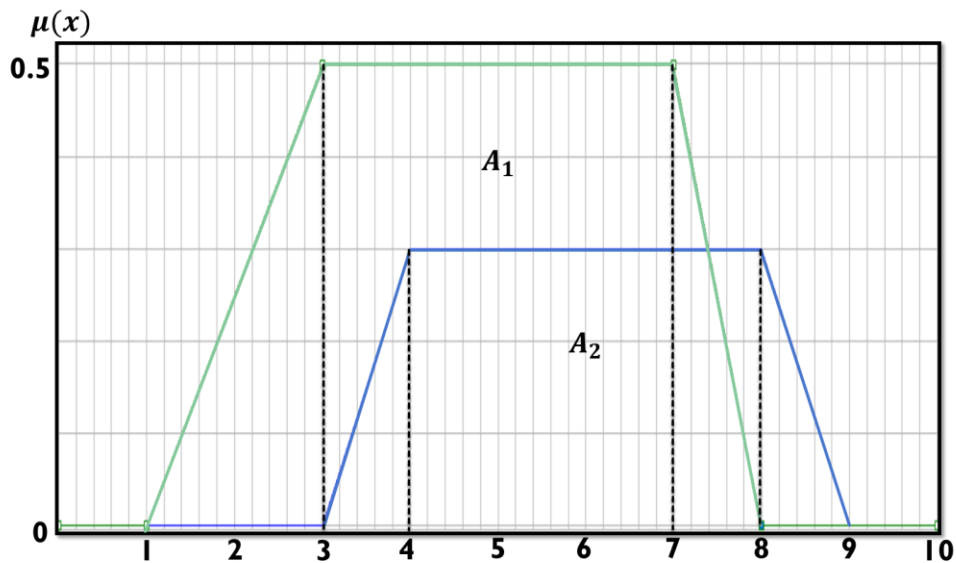


Figura II. 19. Área por defuzzificar del ejemplo tomado de Samanta (2018).

El valor por defuzzificar \hat{x} se define como:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times \bar{x}}{\sum_{i=1}^n A_i} \dots\dots\dots \text{Ecuación II. 16}$$

Donde A_i representa el área el área de las i – reglas y n es el número total de reglas y \bar{x} representa el centro del área. El área de estos dos conjuntos difusos son A_1 y A_2 .

$$A_1 = \frac{1}{2} \times [(8 - 1) + (7 - 3)] \times 0.5 = 2.75$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \times [(9 - 3) + (8 - 4)] \times 0.3 = 1.5$$

Ahora el centro del conjunto difuso A_1 es $\bar{x}_1 = \frac{7+3}{2} = 5$, y para el conjunto difuso A_2 es $\bar{x}_2 = \frac{8+4}{2} = 6$. Con esto el valor defuzzificado resulta:

$$\hat{x} = \frac{A_1 \bar{x}_1 + A_2 \bar{x}_2}{A_1 + A_2} = \left(\frac{2.75 \times 5 + 1.5 \times 6}{2.75 + 1.5} \right) = 5.35$$

C) Centro de Área Mayor (CLA)

Cuando la unión de los conjuntos difusos de salida no es convexa. Este método determina el subconjunto convexo con el mayor área y define la salida defuzzificada como el centro de área de este subconjunto. El resultado es más plausible que el del centro de área del conjunto original.

D) Máximo Central (MOM)

La salida es el valor medio de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia.

E) Primer Máximo (FoM) / Último Máximo (LoM)

Utilizando el conjunto difuso obtenido tras la agregación de todas las reglas, estos métodos toman como resultado el valor más pequeño/grande del dominio de salida que presenta grado de pertenencia máximo.

F) Bisector de área

Es un método que trata de encontrar el valor numérico del elemento del universo que separa el área de la función de pertenencia del conjunto difuso en dos mitades con la misma área.

La **Figura II. 20** representa los métodos de defuzzificación.

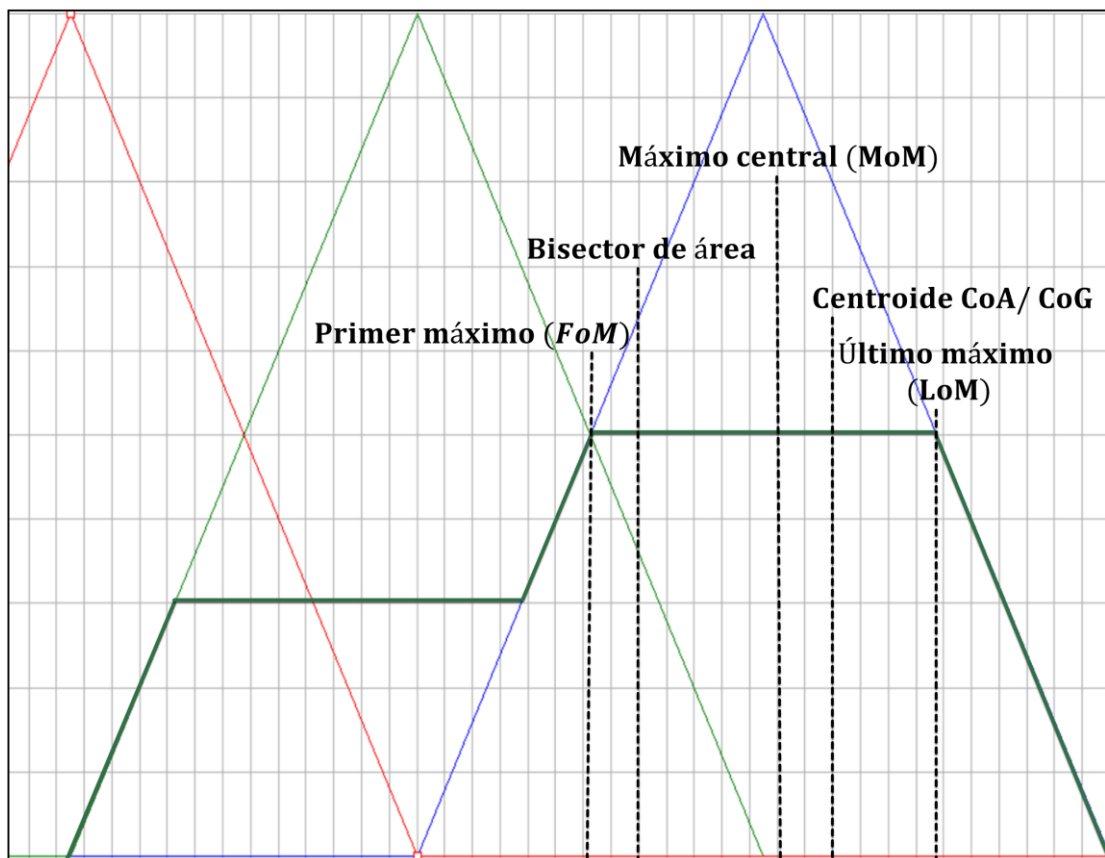


Figura II. 20 Diferentes métodos de defuzzificación (modificado de Diciembre, 2017).

II.3.4 Ventajas y Desventajas

Un controlador difuso al igual que cualquier otra técnica exhibe ventajas y desventajas, Vicent (2014) enlista aspectos que hacen que los controladores difusos sean potencialmente atractivos presentando **ventajas** sobre los controladores clásicos los cuales son:

-
- Reducción de tiempos de diseños y desarrollo de controladores en comparación con controladores tradicionales, de esta forma los costos de inversión se ven favorablemente beneficiados al reducirse.
 - La producción en serie de microprocesadores difusos permiten su oferta a precios altamente competitivos.
 - Permite el desarrollo de alternativas tecnologías sin el riesgo de entrar en conflicto por violar patentes.
 - Permiten la continua mejora sobre los parámetros involucrados sin perder precisión y sin requerir de grandes inversiones.
 - Capacidad de controlar varios procesos al mismo tiempo.
 - Alta capacidad de extraer e interpretar de manera sencilla la experiencia adquirida por operadores expertos sobre un sistema o proceso mediante sencillas reglas Si – Entonces y el uso de variables lingüísticas como “alto”, “normal”, “muy alto”, etc.
 - Representar e instrumentar el conocimiento de alto nivel.

A pesar de ser una técnica innovadora con un amplio rango de aplicación presenta **desventajas**, Vicent (2014), enlista las siguientes:

- La alta dependencia por el conocimiento de un experto, por tanto el diseño se interpreta como ad-hoc.
- No contar con información necesaria y precisa, exhibe un riesgo de que el paradigma basado en reglas no sea consistente.
- Requerir de múltiples especialistas y su correspondiente capacitación sobre el tema ante la escasez de especialistas en lógica difusa es un de reto que se presentan para su adecuada explotación.

Capítulo III: Sistema Difuso para la Calificación de Sitio

En este capítulo se explican las partes del sistema difuso desarrollado que califica a un sitio (un medio geológico), en grados de susceptibilidad para servir a los fines de almacenamiento de CO₂. El sistema trabaja como un simulador que permite al usuario contemplar diferentes salidas a partir de modificaciones a entradas conocidas y/o deseadas. La estructuración se inspira en las recomendaciones de Bachu (2000); CIEMAT (2006) y Dávila (2011) quienes argumentan la calificación del medio sobre características intrínsecas y extrínsecas de las cuencas sedimentarias.

En esta investigación se eligen como propiedades vitales, que deben ser analizadas para emitir una recomendación confiable, a (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006 & Dávila 2011):

1. El estado de la emisión
2. La infraestructura para el transporte
3. El ambiente tectónico
4. Las cualidades de las formaciones almacén y sello
5. El régimen geotérmico y de presión
6. El régimen hidrodinámico
7. Los factores hidrogeoquímicos

Estas características conforman el conjunto de entradas del sistema difuso. La salida se configura como una recomendación sobre la susceptibilidad del objeto a fungir como almacén de CO₂. Es importante recordar que este simulador difuso se presenta como una herramienta útil para las etapas tempranas de un proyecto ingenieril de este tipo, no sustituye los acercamientos de ningún nivel de exploración directa.

III.1 Estado de la emisión

Se debe, determinar el *estado* de la producción antropogénica del CO₂ en términos de su distribución (sobre la región), tipos, ubicación, fuentes y magnitud. En este sistema, la determinación del *estado* debe ser tal que permita manejar una métrica simple en los siguientes análisis. Dada la naturaleza de la herramienta difusa (recomendación preliminar) y para evitar levantamientos o pruebas costosas en un gran número de sitios, se propone utilizar a los siguientes factores como mediciones indirectas de las fuentes y sus magnitudes (asociadas a la emisión) (Nava, 2014):

- A) Tamaño del Complejo Industrial.
- B) Fuerza Laboral en el Complejo.
- C) Giro preponderante en el Complejo.

Cada factor es incluido en un sub sistema difuso que ayuda a categorizar al estado. La categoría salida (*defuzzificada*) se convierte en la primera entrada del sistema difuso global.

III.1.1 Tamaño

Basta una simple apreciación del entorno para ubicar sitios en donde convergen grandes complejos industriales. En esta investigación se utiliza el área que ocupa(n) la(s) industria(s) (complejos o parques) para definir la pertenencia a un *tamaño*. Esta relación se elige porque cuando se habla de grandes espacios, como los de los parques industriales, se infiere que el terreno está urbanizado (carreteras, medios de transporte, servicios públicos, instalaciones industriales específicas, entre otras) y eso significa ventajas para proyectos de captura/almacenamiento (López, 2015; Duana et al., 2010). Algunas de las características derivadas de *tamaño* son:

1. Certeza en los servicios básicos de infraestructura.
2. Certeza en los permisos para operaciones industriales.
3. Ubicación cerca de principales vías de comunicación.
4. Ubicación cerca de los asentamientos humanos y centros de educación.

5. Administración interna que garantiza la seguridad general de los inquilinos y el mantenimiento permanente de la infraestructura.

En México los parques industriales se clasifican por extensión de área ocupada de acuerdo con la Norma Mexicana de Parques Industriales (NMX-R-046-SCFI-2015) así como en la declaración de la ONUDIPI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial) de 1979 (Nava, 2014):

- Pequeño (10 a 20 hectáreas)
- Mediano (21 a 40 hectáreas)
- Grande (41 a 200 hectáreas)
- Muy Grande (superior 201 hectáreas)

Con esta información se construyen los conjuntos difusos de la variable lingüística *Tamaño*: Pequeño, Mediano, Grande y Muy Grande. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto pequeña está en 20 hectáreas o menos, para mediana en 65 hectáreas, para grande en 155 hectáreas y para muy grande están en 200 hectáreas o más. Es importante mencionar que los valores para definir los típicos parten de experiencias de expertos, recomendaciones de la fuente citada y ensayos prueba-y-error con el sub sistema difuso contra casos bien documentados (**Figura III. 1**).

Para un *Tamaño* superior a 300 o inferior a 0.1 hectáreas (sin ser 0 absoluto) basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

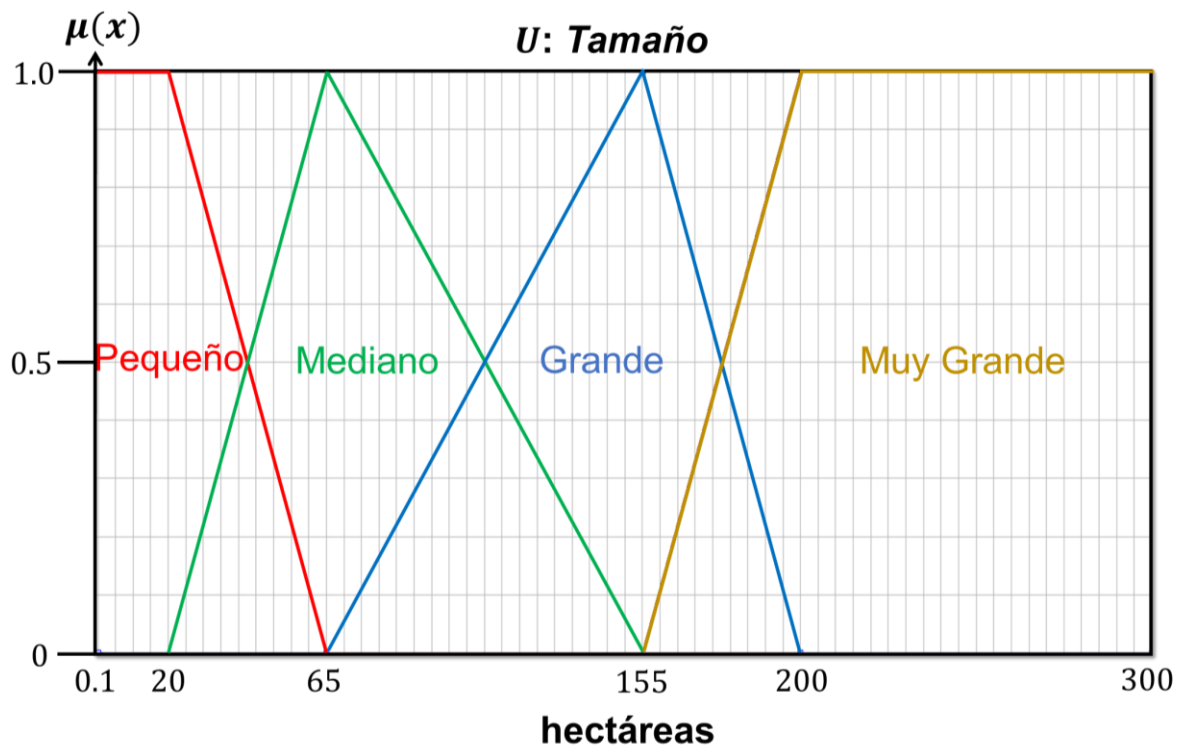


Figura III. 1. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Tamaño*.

III.1.2 Fuerza Laboral

La fuerza laboral de una industria, de forma muy simple, se refiere al número de empleados de ésta. Para definir las etiquetas de esta variable se usó la clasificación de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) (Corporación Financiera Internacional, 2012):

- Micro industria (< 10 empleados)
- Pequeña industria (10 – 49 empleados)
- Mediana industria (50 – 249 empleados)
- Gran industria (> 250 empleados)

Con esta información se construyen los conjuntos difusos: Mínima, Abundante y Suprema. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto mínima está en 50 empleados o menos, para abundante 150 empleados y para suprema en 250 empleados o más (**Figura III. 2**).

Para una *Fuerza laboral* superior a 300 empleados basta con asignar el valor típico máximo. Recuerde que en el caso de un parque con varias industrias, el número de empleados se relaciona con el total de los censados en toda el área.

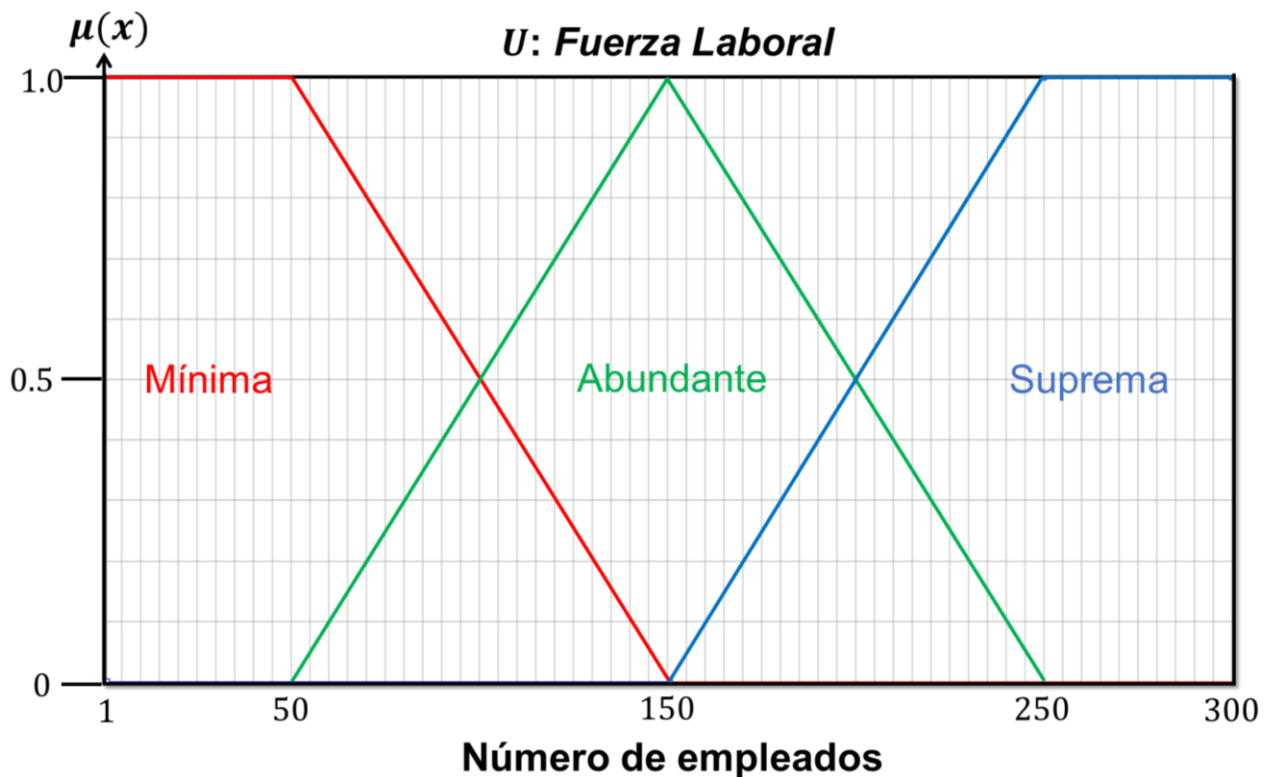


Figura III. 2. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Fuerza Laboral*.

III.1.3 Giro

Esta variable relaciona a la actividad industrial con la capacidad del sitio para generar elementos contaminantes. Entre los organismos que han evaluado el impacto de cada industria al calentamiento global está el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate

Change), el cual brinda una clasificación muy simple y consistente. Para el IPCC las industrias se dividen en:

- las que se encargan de la extracción de materia prima,
- las que se encargan de la manufactura de la materia prima
- las que se encargan de la creación de objetos físicos finales.

Para definir las etiquetas de esta variable se utilizaron los porcentajes asignados a cada industria del total de emisiones de origen antropogénico y estacionarias a nivel global de CO_2 reportados por la AIE en 2005 (**Tabla III. 1**) (Gale et al, 2005).

Tabla III. 1. Principales industrias con aportes a la emisión de CO_2 de fuentes antropogénicas y estacionarias en 2005 (modificado de Gale, et al, 2005).

Industria	Porcentaje de aporte a las emisiones globales de CO_2 (%)
Eléctrica	38
Gas y Aceite	14
Cemento	11.6
Química	9.5
Hierro y Acero	9.3
Aluminio	3.7
Carbón	3
Celulosa, Papel e Imprenta	2.5
Maquinaria	2.3
Tabaco y Comida	2.3
Otras	3.8

Con esta información se construyeron los conjuntos difusos de la variable lingüística *Giro*: Poco Desfavorable, Nocivo y Muy Amenazante. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto poco desfavorable está en 12.5 por ciento o menos, para nocivo en 24.5

por ciento y para muy amenazante en 37.5 por ciento o más (**Figura III. 3**). Ya que en un parque industrial puede darse el caso de presencia de industrias de distintos ramos, para el uso de esta variable se recomienda usar los acumulados con cada industria (**Tabla III. 1**) (Iglesias, 2012). Un *Giro* superior a 50% indica el valor típico máximo para una(s) industria(s) *Amenazante*.

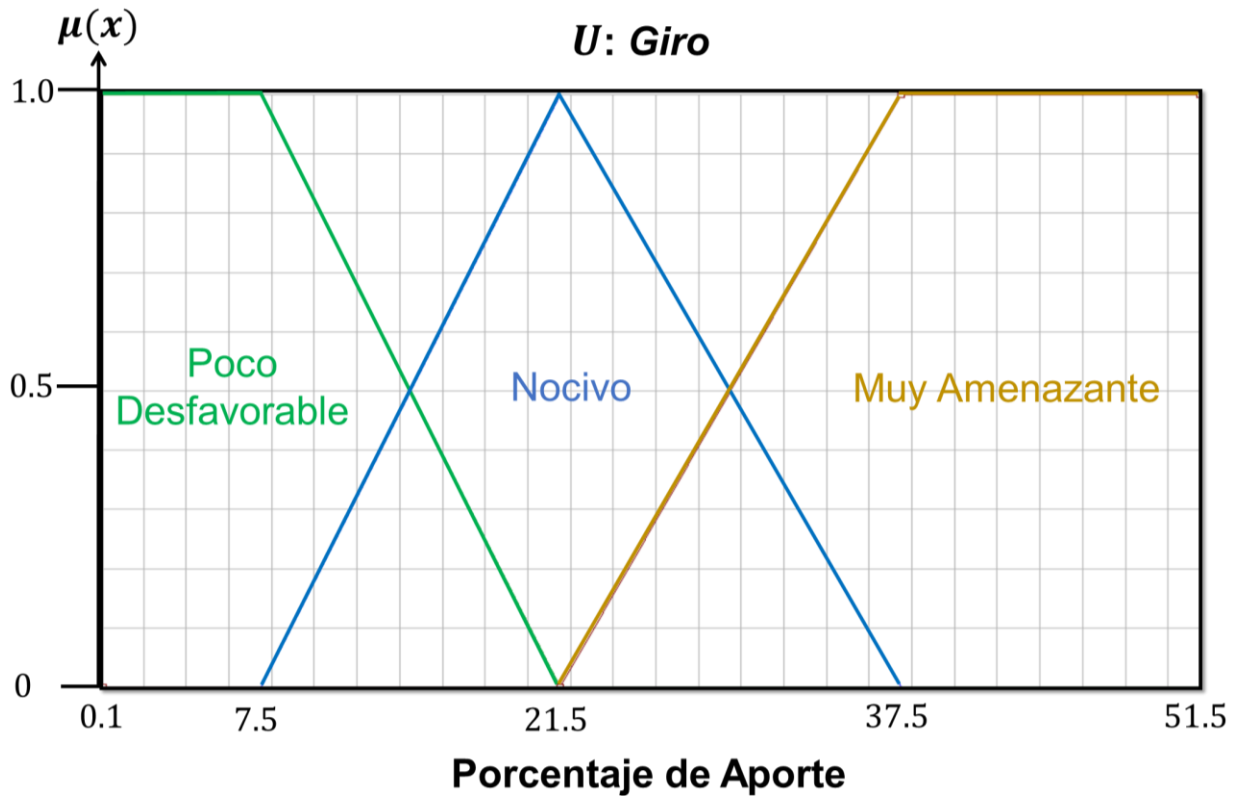


Figura III. 3 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Giro*.

III.1.4 Salida, Estado de la Emisión

Las tres variables de entrada (*Tamaño*, *Fuerza Laboral* y *Giro*) definen el *Estado de la Emisión*. En este trabajo de investigación se propone que, en términos de porcentaje de 0/100, se califiquen a las fuentes y sus magnitudes (asociadas a la emisión), donde 0% significa que la emisión no representa o significa lo suficiente como para emprender un proyecto de captura y almacenamiento y 100% que el sitio es un sujeto ideal para invertir dada la extrema relevancia de las emisiones.

Los conjuntos difusos de la variable lingüística *Estado de la Emisión* son Irrelevante, Notable y Extremo. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto irrelevante están en 25 por ciento o menos, para notable en 50 por ciento y para extrema en 75 por ciento o más (**Figura III. 4**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos bien documentados (y respaldados por la experiencia de expertos).

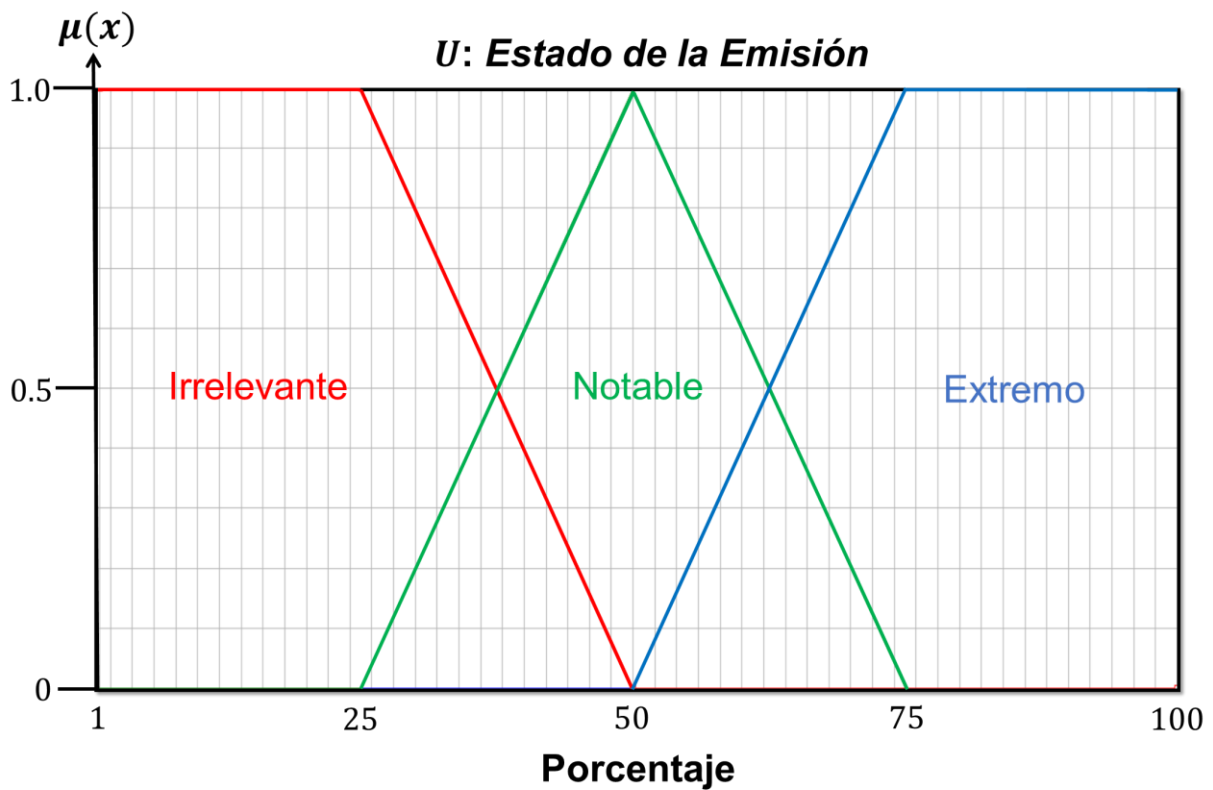


Figura III. 4 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Estado de la Emisión*.

El bloque de reglas del sub sistema con 3 variables de entrada (*Tamaño, Fuerza Laboral y Giro*) y una variable de salida (*Estado de la Emisión*) está compuesto por 108 reglas posibles, con 37 reglas de DoS igual a 1 y 71 con un grado de soporte igual a 0. En la **Tabla III. 2** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si-Entonces.

Tabla III. 2. Reglas difusas para el subsistema difuso de la variable lingüística *Estado de la Emisión*.

Número de Regla		Tamaño		Fuerza Laboral		Giro		Estado de la Emisión	DoS
1	SI	Pequeño	Y	Mínima	Y	Poco Desfavorable	ENTONCES	Irrelevante	1.00
108	SI	Muy Grande	Y	Suprema	Y	Muy Amenazante	ENTONCES	Extremo	1.00
92	SI	Muy Grande	Y	Suprema	Y	Poco Desfavorable	ENTONCES	Notable	1.00
72	SI	Grande	Y	Abundante	Y	Muy Amenazante	ENTONCES	Extremo	1.00
41	SI	Mediano	Y	Abundante	Y	Nocivo	ENTONCES	Notable	1.00
55	SI	Grande	Y	Mínima	Y	Poco Desfavorable	ENTONCES	Irrelevante	1.00
3	SI	Pequeño	Y	Mínima	Y	Poco Desfavorable	ENTONCES	Extremo	0.00
31	SI	Mediano	Y	Mínima	Y	Nocivo	ENTONCES	Irrelevante	0.00
56	SI	Grande	Y	Mínima	Y	Poco Desfavorable	ENTONCES	Notable	0.00
107	SI	Muy Grande	Y	Suprema	Y	Muy Amenazante	ENTONCES	Irrelevante	0.00

Para aclarar el funcionamiento de este sub sistema se propone el siguiente ejercicio. Suponga que en la cuenca sedimentaria X se encuentra un parque industrial con las siguientes características:

- *Tamaño* =170 hectáreas
- *Fuerza Laboral*: 210 trabajadores (sumadas dos industrias)
- *Giro Preponderante*: cemento y hierro/acero

En primera instancia estos valores deben someterse a fuzzificación (**Figura III. 5, Figura III. 6, y Figura III. 7**).

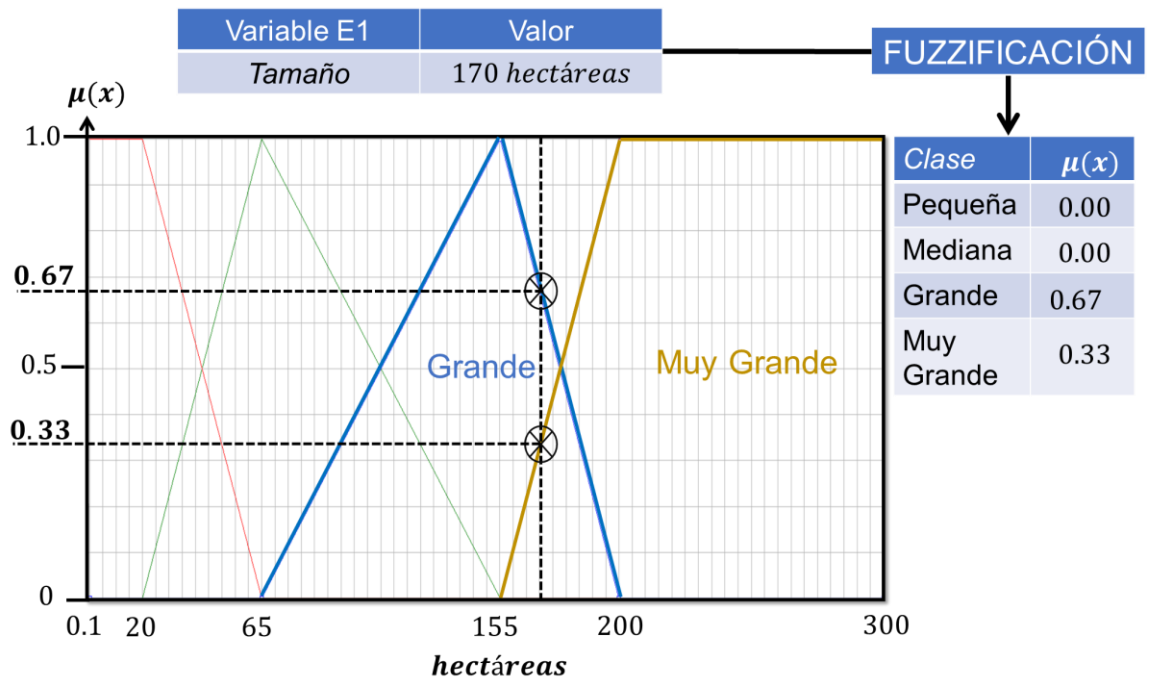


Figura III. 5. Fuzzificación de la variable *Tamaño* (170 hectáreas)

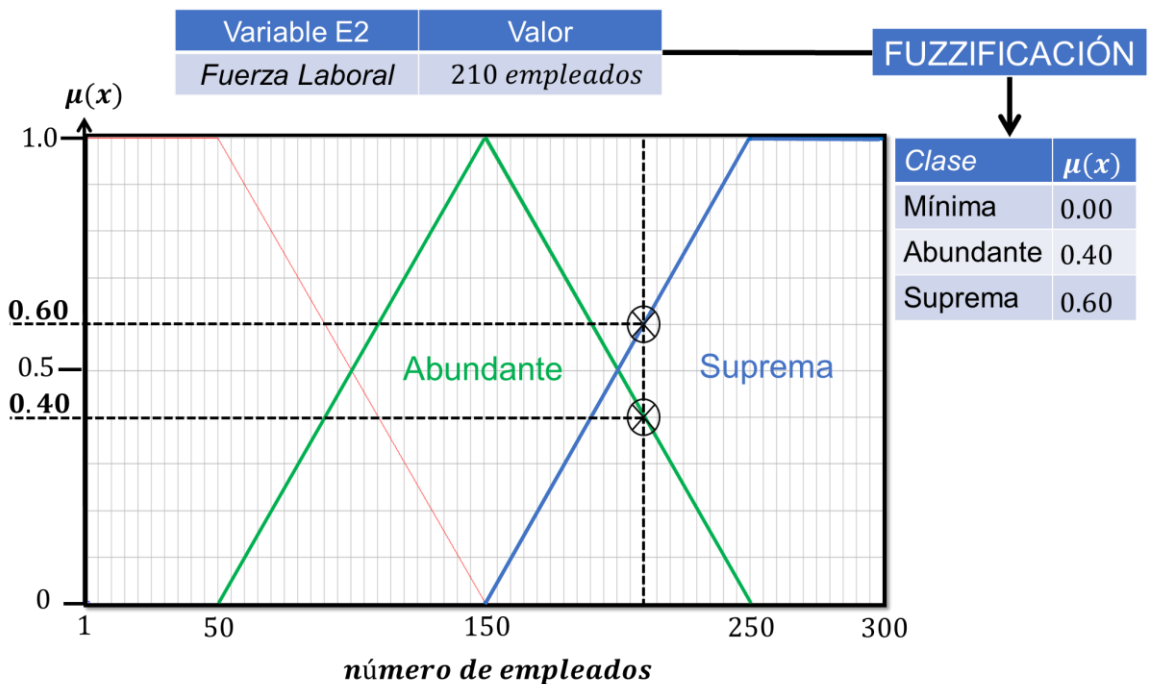


Figura III. 6. Fuzzificación de la variable *Fuerza Laboral* (210 empleados)

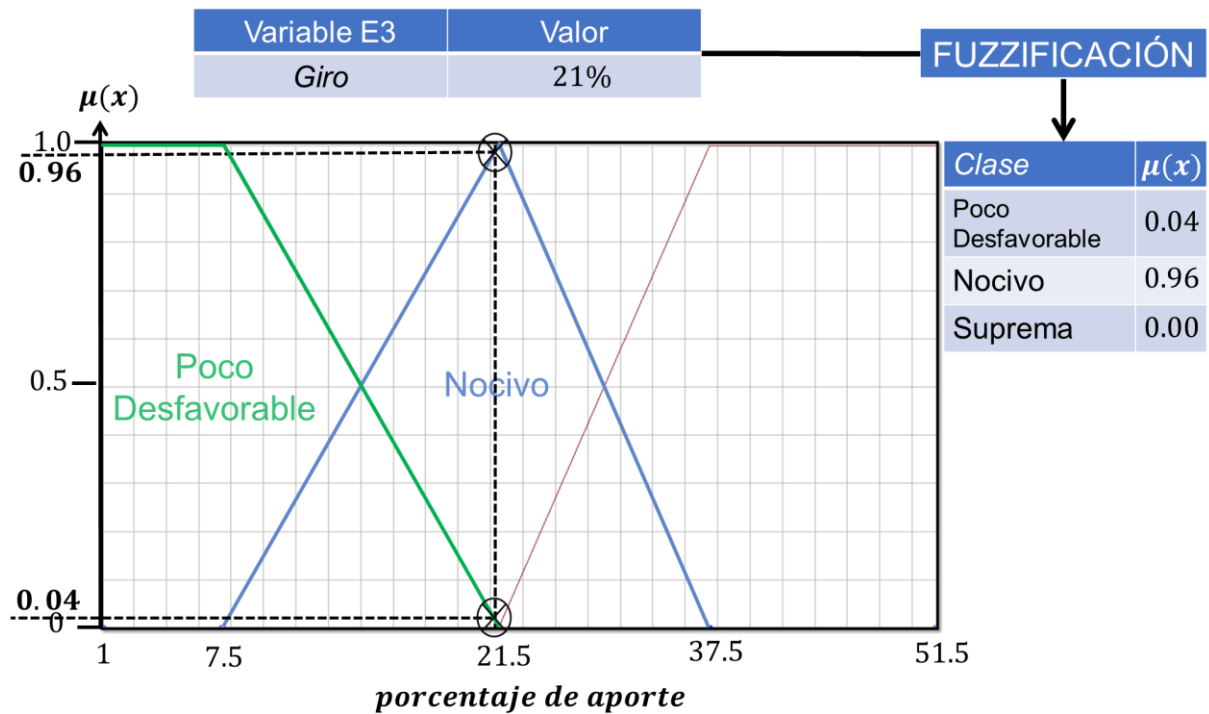


Figura III. 7 Fuzzificación de la variable *Giro* (21 %)

Paso seguido será necesario evaluar las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas. Así se obtiene el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla. Para este sistema se considera el operador AND de Zadeh para realizar la evaluación de las reglas. Se muestran dos ejemplos de este proceso: la regla 77 y la regla 96 (**Figura III. 8** y **III. 9**).

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto.

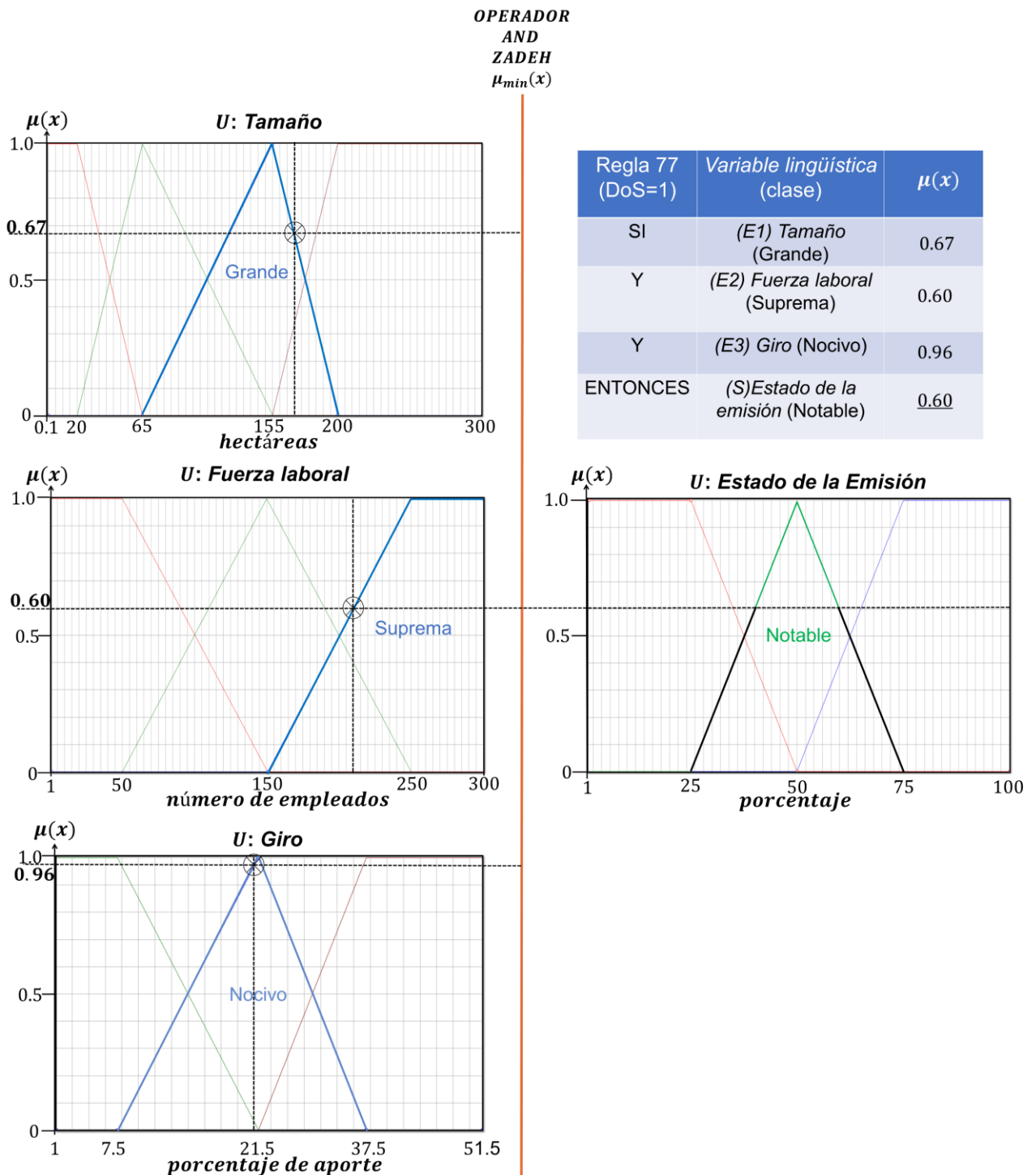


Figura III. 8. Proceso de análisis de la regla 77 para el ejemplo del sub sistema difuso.

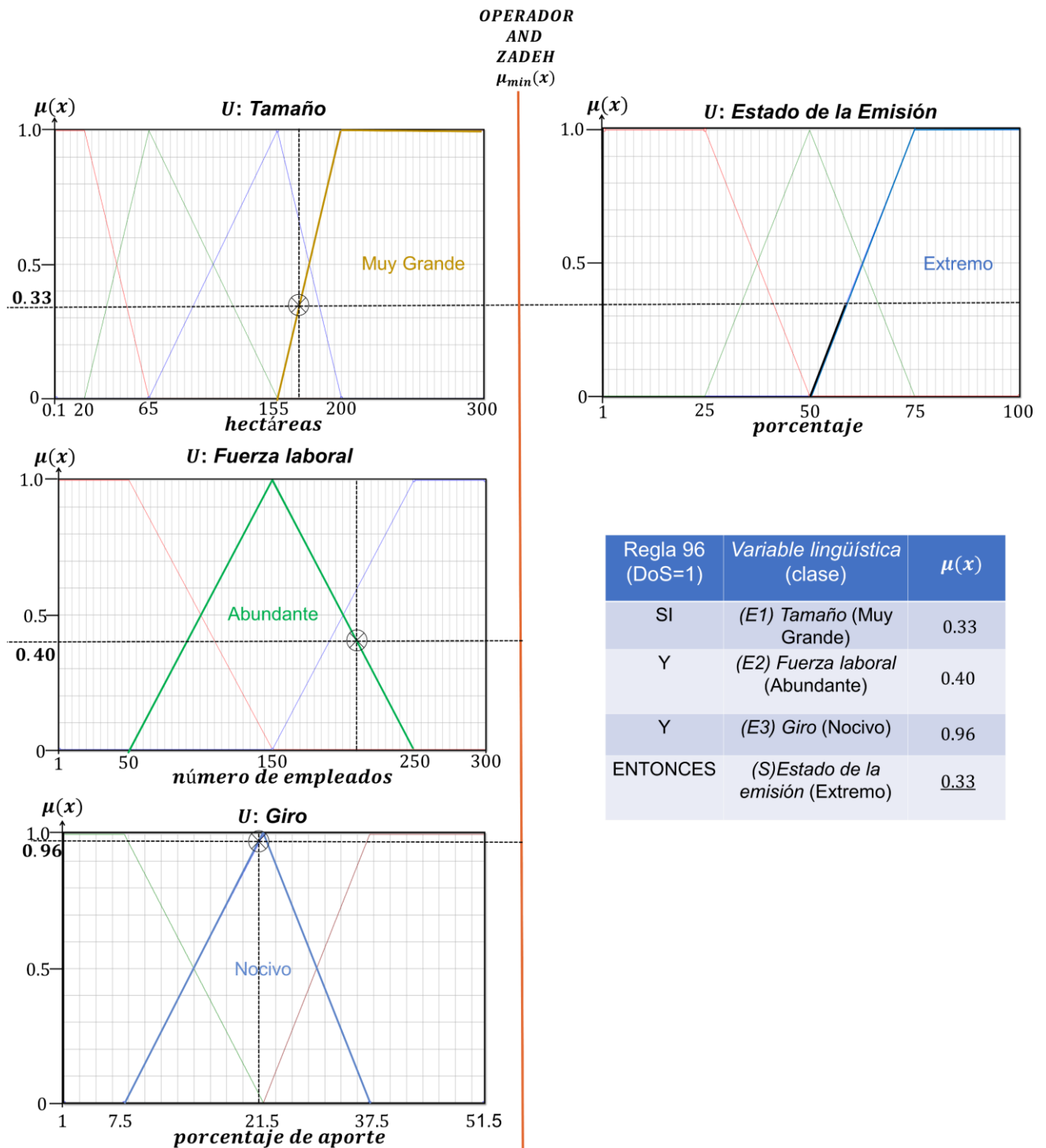


Figura III. 9 Proceso de análisis de la regla 96 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Una vez realizada la evaluación de reglas y obtenido los DoV se activa la agregación para obtener la salida difusa (**Figura III. 10**). Es importante mencionar que las reglas mostradas como ejemplo, son a su vez las reglas cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas tanto para el conjunto difuso Notable como para el conjunto difuso Extremo de la variable lingüística *Estado de la Emisión*.

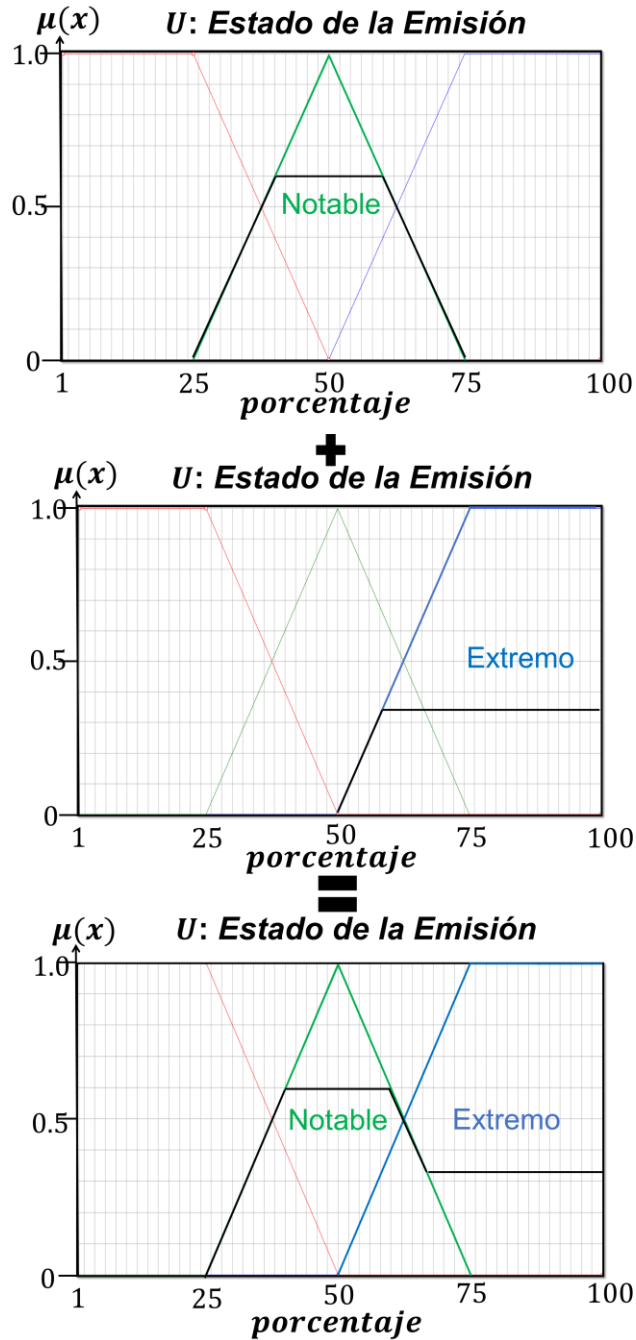


Figura III. 10 Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 11**). Para el ejemplo se concluye que el *Estado de la Emisión* de este complejo pertenece:

0.60 al conjunto Notable

0.33 al conjunto Extremo

Con un valor de 63.4% en la base de la variable *Estado de la Emisión*.

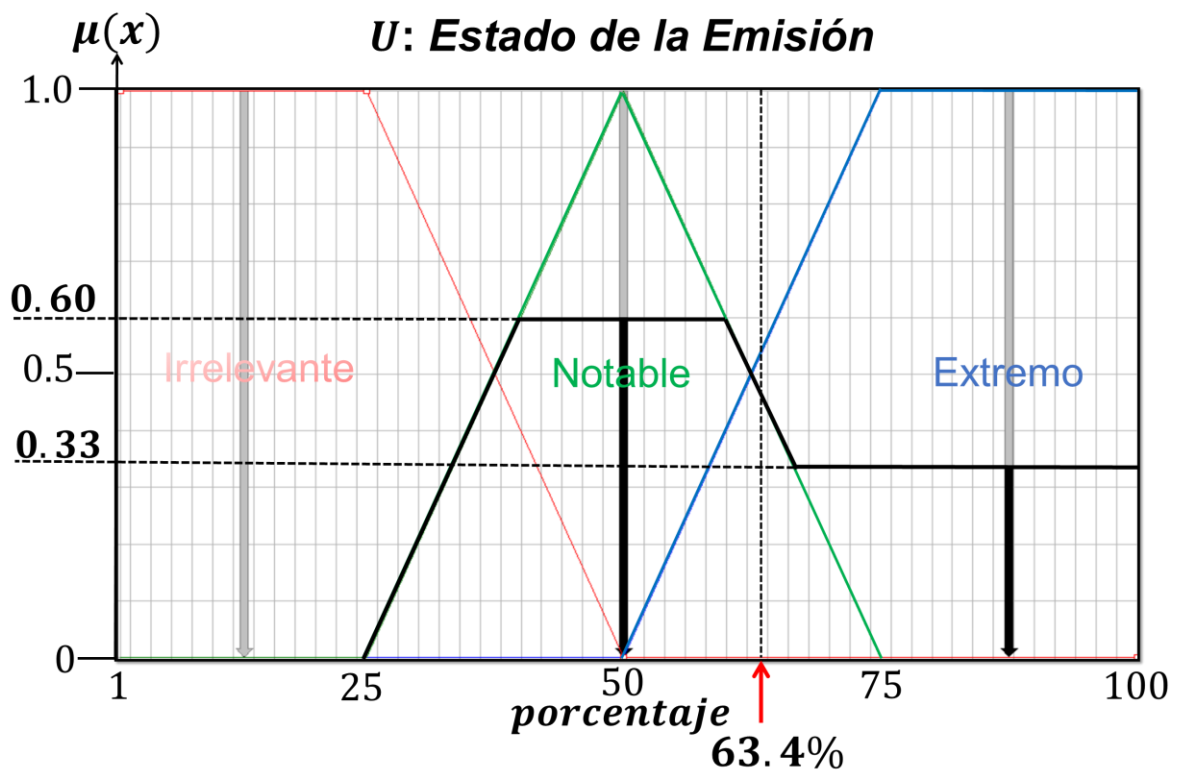


Figura III. 11. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.

III.2 Disponibilidad.

Con esta variable se califica la infraestructura que existe en sitio y el grado en la que es adecuada para el transporte del CO_2 (desde el punto de captura hasta el sitio almacén). La existencia de esta infraestructura o al menos las bases para su desarrollo impactarán favorablemente en la reducción de costos de transporte (Bachu, 2003).

El objeto de infraestructura más importante son las tuberías (el sistema más rentable para el transporte) y al mismo tiempo es el que representa la tecnología mejor establecida y más estudiada (principalmente para el transporte de hidrocarburos) (Muñoz et al, 2011; IPCC, 2005). Los sistemas de ductos (tuberías de acero al carbón) se clasifican en (Cortes, 2012):

- Ductos para el transporte de hidrocarburos líquidos (oleoductos): tuberías que se destinan al transporte de petróleo crudo, condensados, gasolina, gases licuados, amoníaco y productos derivados de la refinación de petróleo.
- Ductos para el transporte y distribución de hidrocarburos gaseosos (gasoductos): tuberías que se destinan al transporte y distribución de productos en estado gaseoso, gas natural derivado de la extracción o gases obtenidos a partir del tratamiento o destilación del petróleo.

Los gasoductos son el método más común de transporte de CO_2 . Estas redes tienen como meta transportar de forma económica, rápida y segura (Cortés,2012). En esta investigación se analizan los aspectos mencionados y lo referido a la urbanización del sitio a través de la variable *Disponibilidad*, la cual se estructura en un sub sistema difuso compuesto por tres entradas:

1. *Cobertura de gasoductos* dentro del parque industrial
2. *Infraestructura* de captura, compresión y tanque de almacenamiento (CCA) dentro del parque industrial.
3. *Comunicación* entre el sitio de captura y el sitio de almacén.

Estos 3 parámetros dependen del inventario de infraestructura del parque industrial (o campo) y se refiere tanto a la interna a la que conecta con el exterior del parque.

III.2.1 Cobertura

Establecer con precisión los kilómetros cubiertos por gasoductos dentro de un parque industrial es complicado, sobre todo en una fase inicial de estudio, por lo que se propone una medida aproximada en términos de porcentaje:

$$\% \text{ Cobertura} = \frac{\text{Área cubierta por gasoductos}}{\text{Área del Parque}} \times 100$$

Los conjuntos difusos propuestos para la variable lingüística *Cobertura* son: Limitada, Apenas Suficiente y Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto limitada está en 15 por ciento o menos, para apenas suficiente en 40 por ciento y para suficiente está en 75 por ciento o más (**Figura III. 12**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos bien documentados.

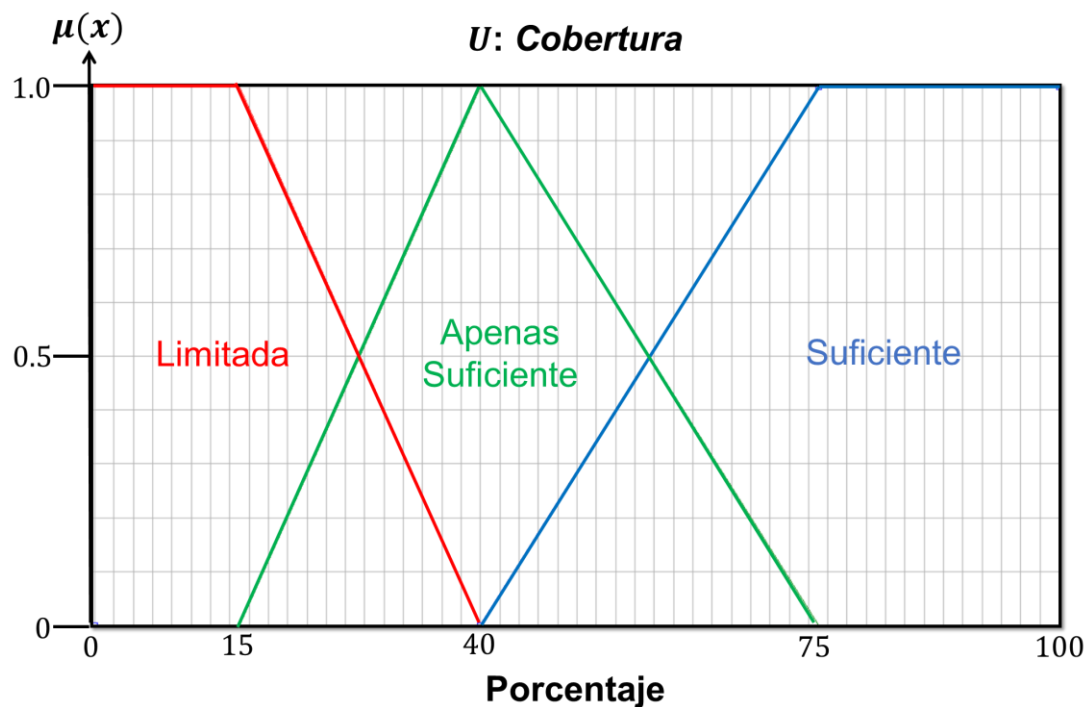


Figura III. 12 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Cobertura*.

III.2.2 Infraestructura de CCA

De forma similar a Cobertura, esta variable se analiza conceptual y aproximadamente con la siguiente relación:

$$\% \text{ Infraestructura CCA} = \frac{\text{Área cubierta por Infraestructura CCA}}{\text{Área del Parque}} \times 100$$

Los conjuntos difusos propuestos para la variable lingüística *Infraestructura de CCA* son: Limitada, Apenas Suficiente y Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto limitada está en 10 por ciento o menos, para apenas suficiente en 30 por ciento y para suficiente está en 65 por ciento o más (

Figura III. 13).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles.

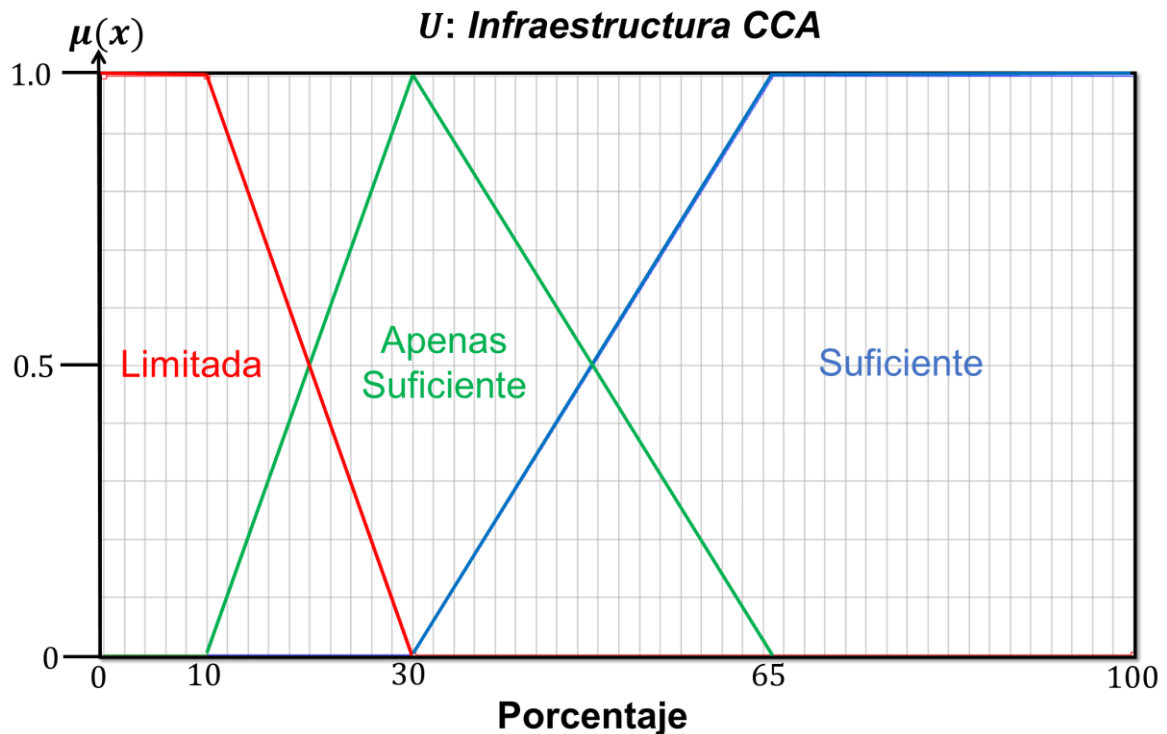


Figura III. 13 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Infraestructura CCA*.

III.2.3 Comunicación

Con la tercer variable se analiza la distancia cubierta por gasoductos que conectan al sitio de captura con el área de almacenamiento, nuevamente se propone una aproximación en porcentaje:

Los conjuntos difusos para la variable lingüística *Comunicación* son: Escasa, Parcial y Completa. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto escasa está en 20 por ciento o menos, para parcial en 60 por ciento y para completa está en 85 por ciento o más (

Figura III. 13).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos.

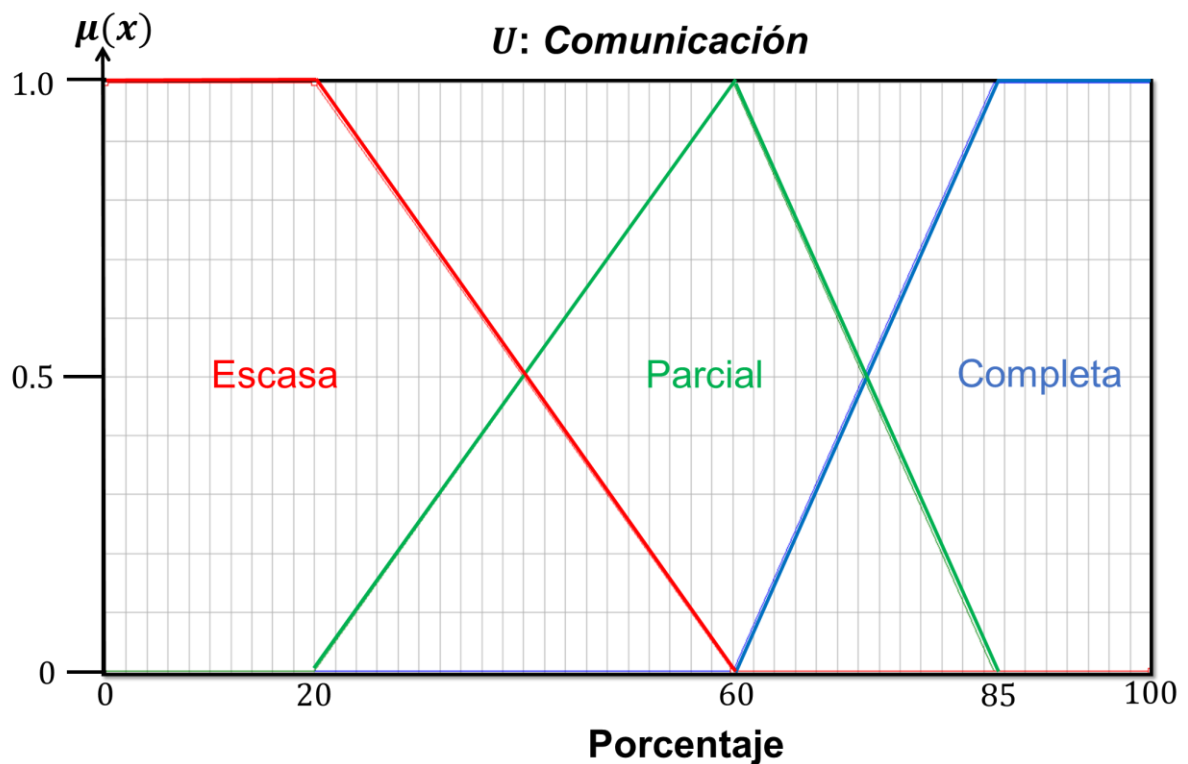


Figura III. 14 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Comunicación*.

III.2.4 Salida: Disponibilidad

A partir de las tres variables de entrada (*Cobertura*, *Infraestructura CCA* y *Comunicación*) se define la *Disponibilidad* como Mínima, Moderada y Total. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto mínima están en 20 por ciento o menos, para moderada en 45 por ciento y para total en 70 por ciento o más (**Figura III. 4**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos bien comprendidos.

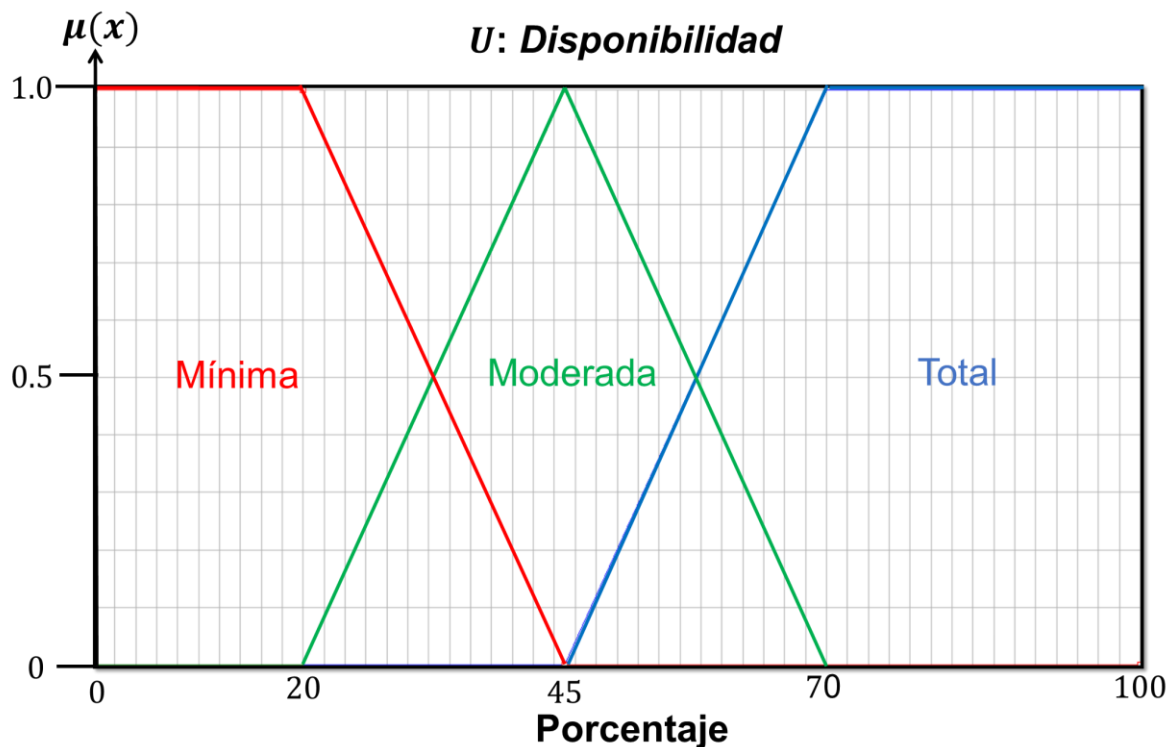


Figura III. 15 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Disponibilidad*.

El bloque de reglas de este sub sistema está compuesto por 81 posibles, con 28 reglas de DoS igual a 1 y 53 con un grado de soporte igual a 0. En la **Tabla III. 3** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si-Entonces.

Tabla III. 3. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Disponibilidad*.

Número de Regla		Cobertura		Infraestructura CCA		Comunicación		Disponibilidad	DoS
1	SI	Limitada	Y	Limitada	Y	Escasa	ENTONCES	Mínima	1.00
81	SI	Suficiente	Y	Suficiente	Y	Completa	ENTONCES	Total	1.00
41	SI	Apenas Suficiente	Y	Apenas Suficiente	Y	Parcial	ENTONCES	Moderada	1.00
59	SI	Suficiente	Y	Limitada	Y	Parcial	ENTONCES	Moderada	1.00
78	SI	Suficiente	Y	Suficiente	Y	Parcial	ENTONCES	Total	1.00
35	SI	Apenas Suficiente	Y	Limitada	Y	Completa	ENTONCES	Moderada	1.00
3	SI	Limitada	Y	Limitada	Y	Escasa	ENTONCES	Total	0.00
79	SI	Suficiente	Y	Suficiente	Y	Completa	ENTONCES	Mínima	0.00
27	SI	Limitada	Y	Suficiente	Y	Completa	ENTONCES	Total	0.00
71	SI	Suficiente	Y	Apenas Suficiente	Y	Completa	ENTONCES	Moderada	0.00

Para aclarar el funcionamiento de este sub sistema se propone el siguiente ejercicio. El responsable del parque industrial Y ha informado que este tiene las siguientes características:

- Cobertura Gasoductos: 40%
- Infraestructura CCA: 20%
- Comunicación: 65%

En primera instancia estos valores deben someterse a fuzzificación (**Figura III. 16, Figura III. 17 y Figura III. 18**).

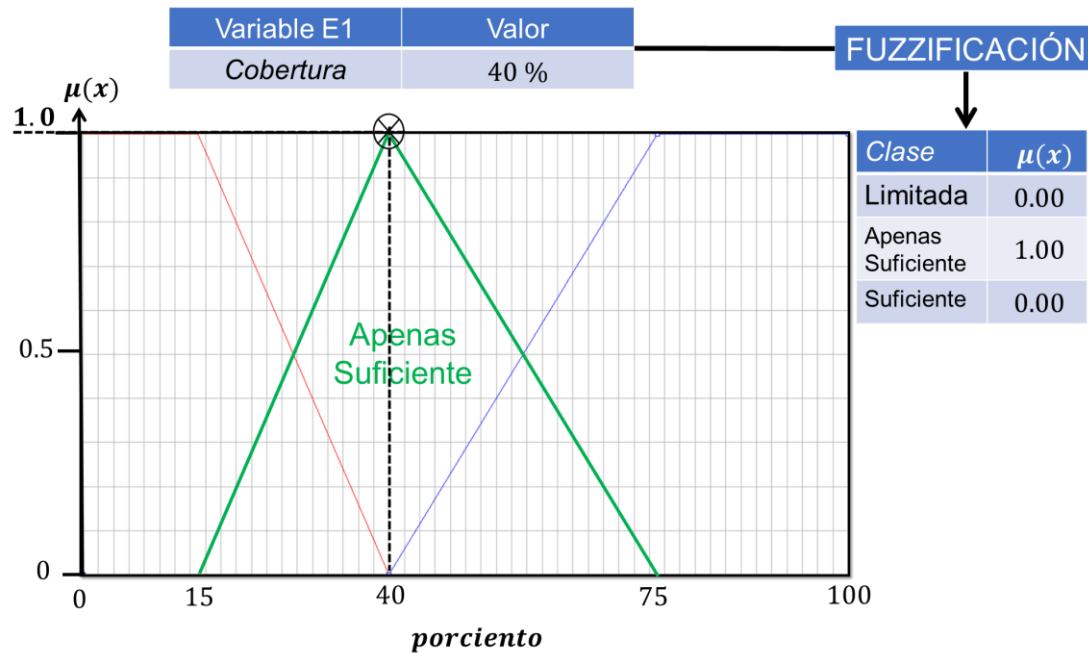


Figura III. 16. Fuzzificación de la variable *Cobertura* (40%)

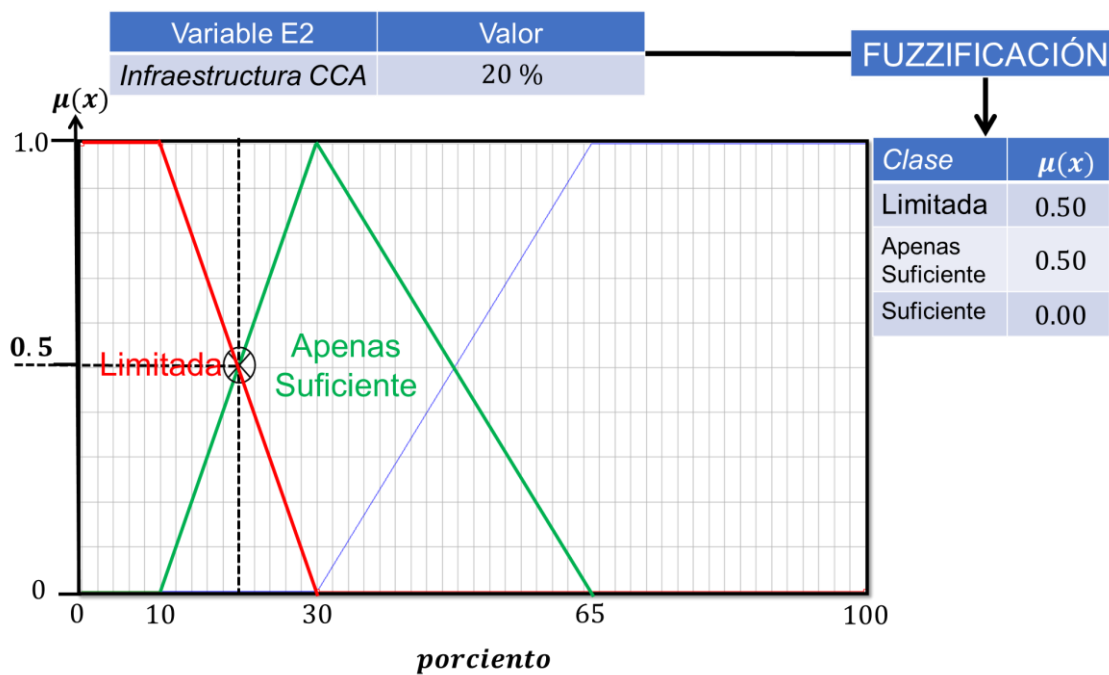


Figura III. 17. Fuzzificación de la variable *Infraestructura CCA* (20%)

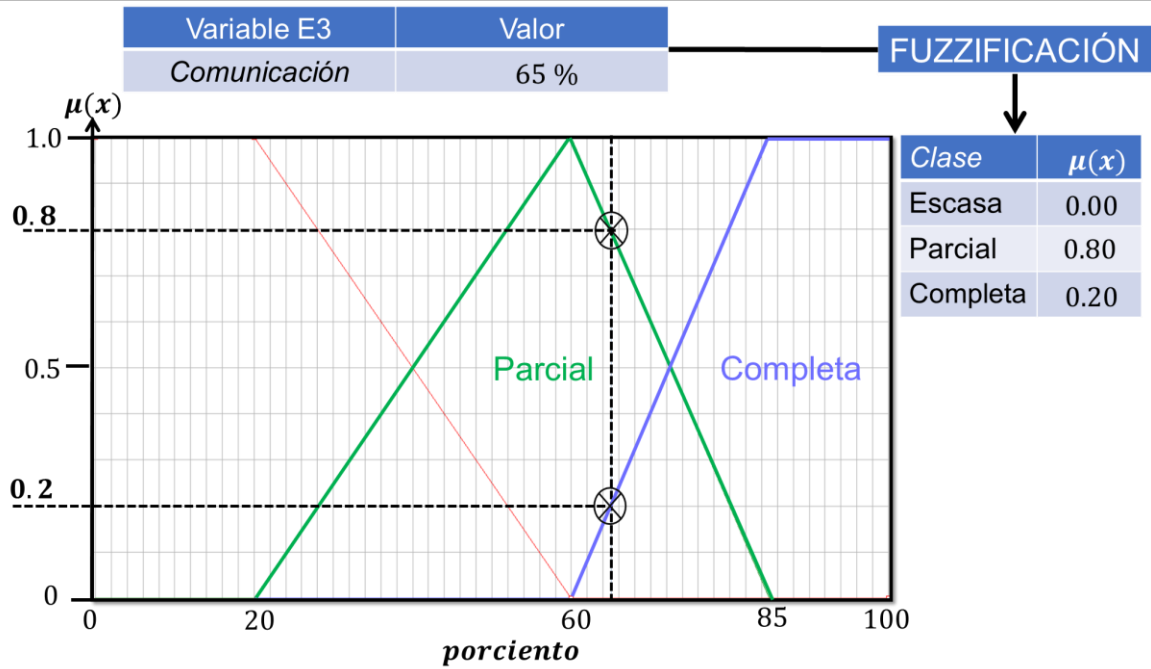


Figura III. 18. Fuzzificación de la variable *Comunicación* (65%)

A continuación se evalúan las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas. Con el objetivo de obtener el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla, para este sistema se considera el operador AND de Zadeh. Se muestran dos ejemplos de este proceso: la regla 32 y la regla 45 (**Figura III. 19** y **Figura III. 20**).

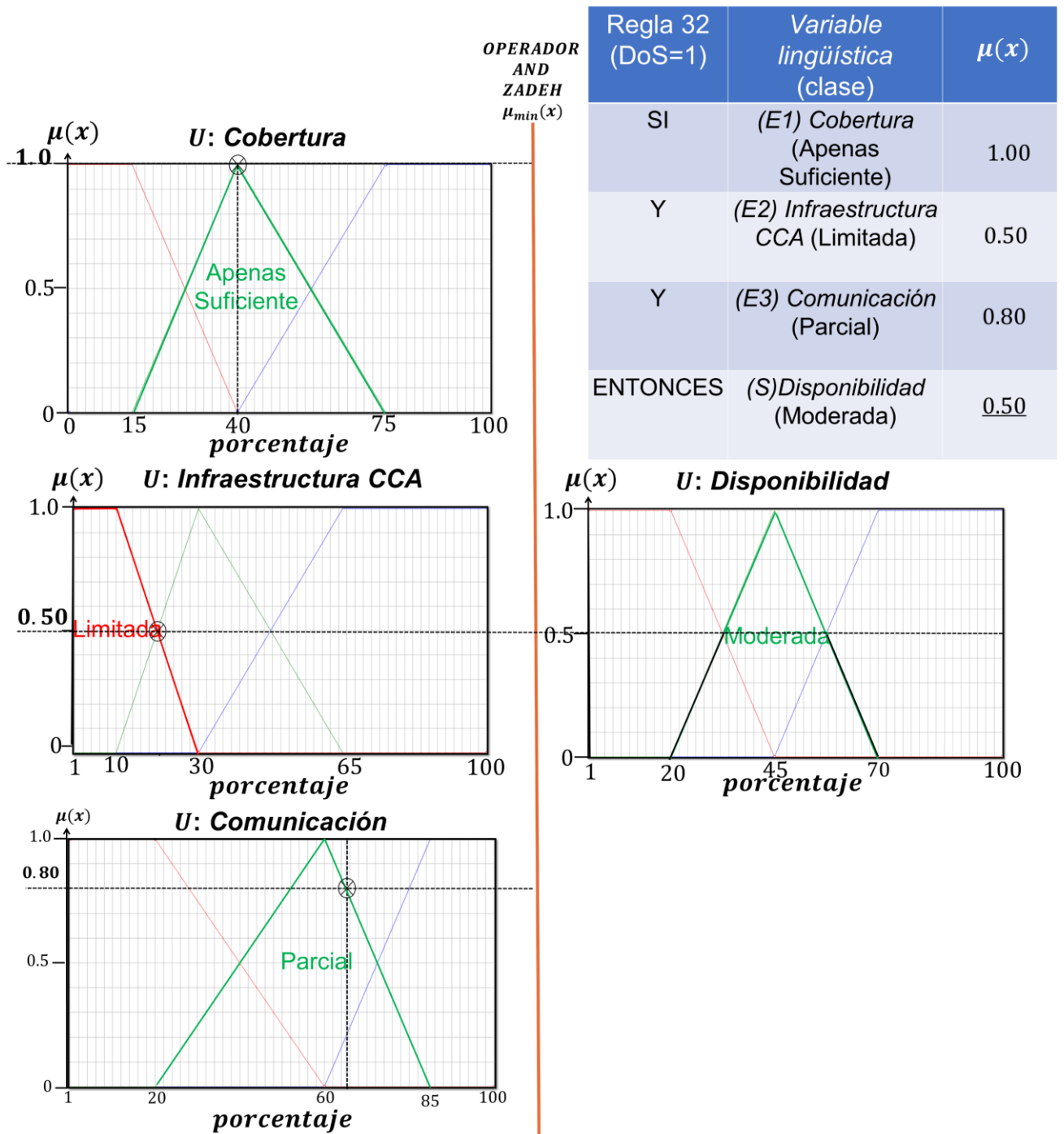


Figura III. 19. Proceso de análisis de la regla 32 para el ejemplo del sub sistema difuso.

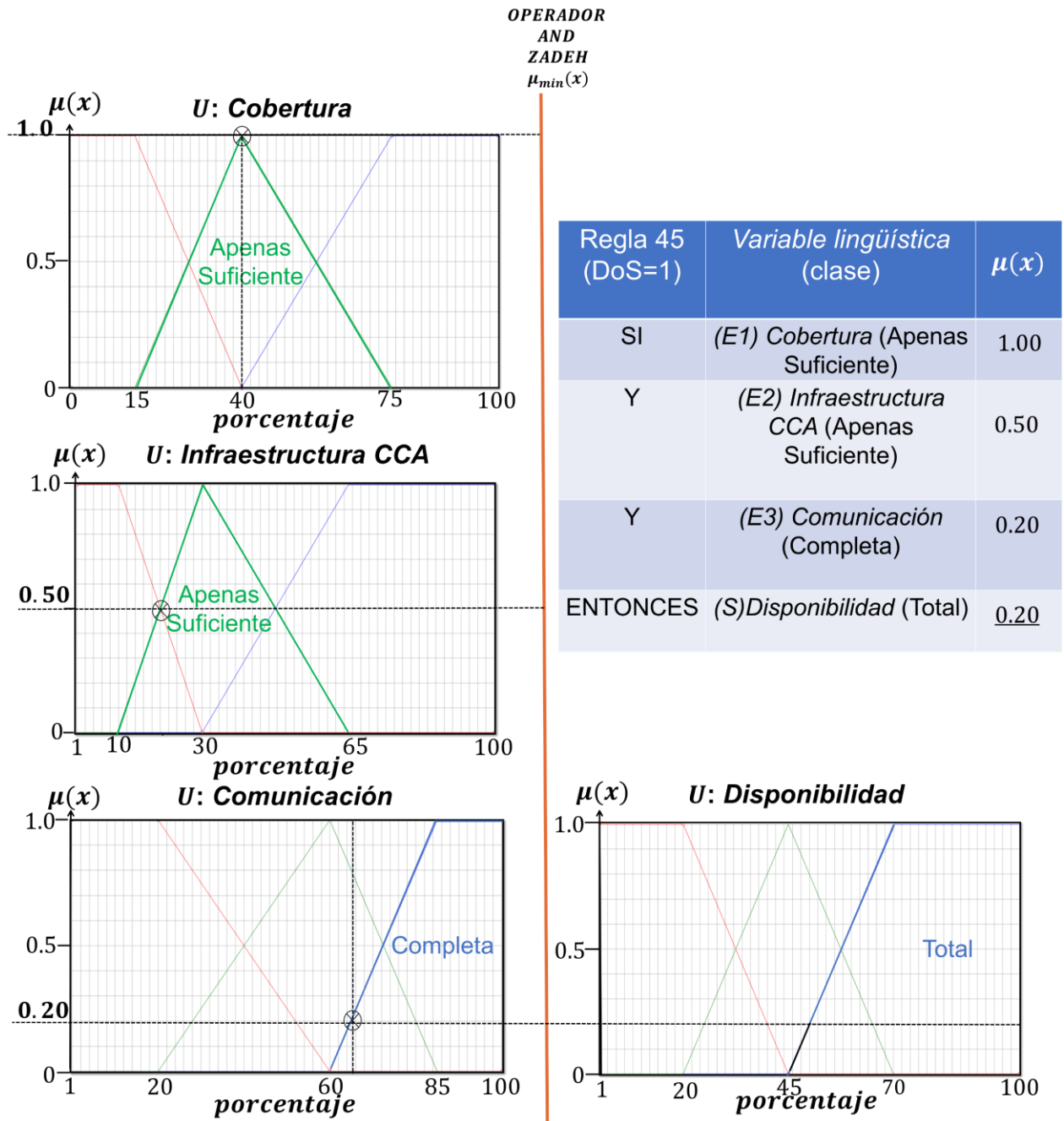


Figura III. 20. Proceso de análisis de la regla 45 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto .

Una vez realizada la evaluación de reglas y obtenido los DoV será necesario realizar el proceso de agregación (**Figura III. 21**) que permitirá obtener la salida difusa. Es importante mencionar que las reglas 32 y 45 mostrada como ejemplo, son las regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Moderada y Parcial.

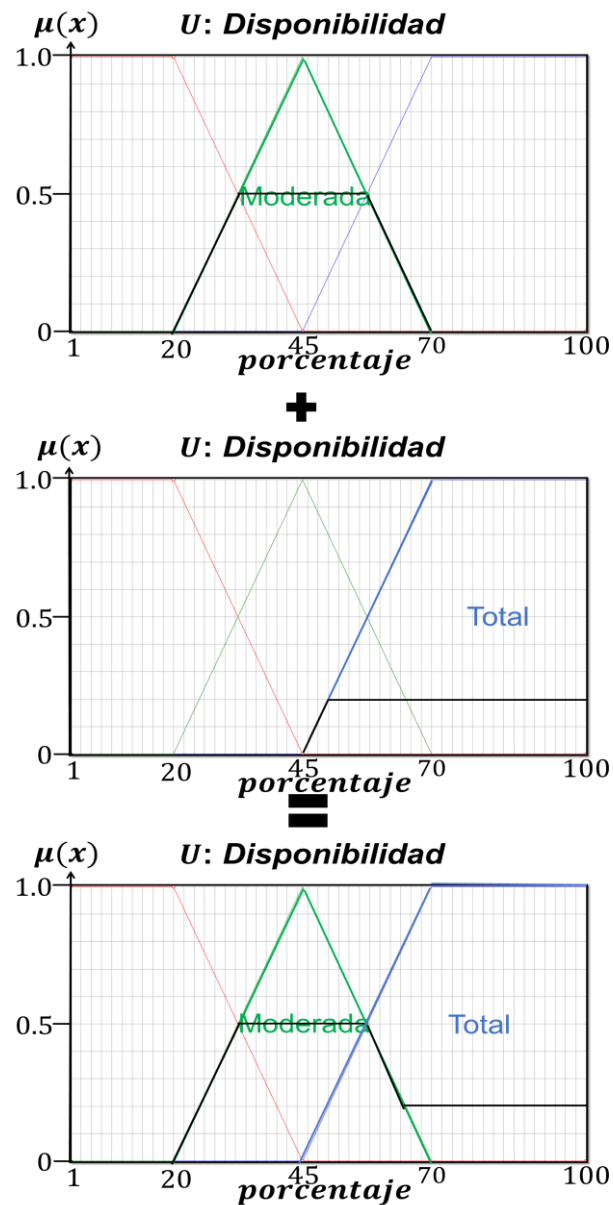


Figura III. 21. Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 22**). Para el ejemplo se concluye que la *Disponibilidad* de este complejo pertenece:

0.50 al conjunto Moderada

0.20 al conjunto Total

Con un valor de 56.426% en la base de la variable *Disponibilidad*.

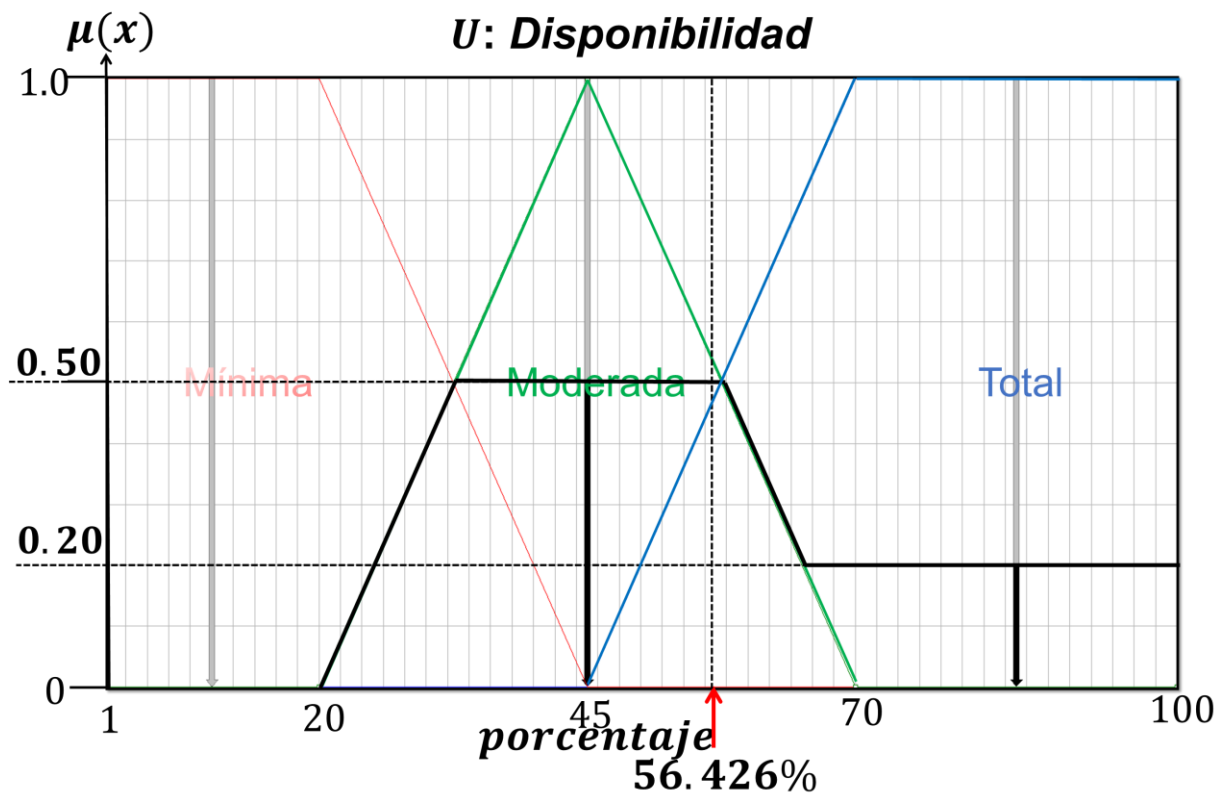


Figura III. 22. Defuzzificación mediante el método de centroide.

III.3 Tectónica

Con esta variable se busca enunciar el nivel de amenaza por la actividad tectónica en la cuenca (sitio) bajo estudio. Esta variable, en realidad un concepto integral y multifacético, agrega factores de riesgo como el fracturamiento, fallamiento, deformación y plegamiento de las formaciones geológicas que, de manera muy importante, afectan la integridad de los proyectos de almacenamiento. Las regiones en donde la actividad tectónica sea muy baja o nula serán las mejores candidatas para el desarrollo de estos proyectos.

La interacción entre placas tectónicas (límites) incide directamente en el nivel de actividad tectónica, siendo aquellas regiones próximas a límites transformantes y convergentes las de mayor actividad (y donde se han registrado los sismos de mayor magnitud y con consecuencias más devastadoras) y aquellas regiones próximas a límites divergentes tienen una actividad casi nula (**Figura III. 23**) (Bachu, 2000).

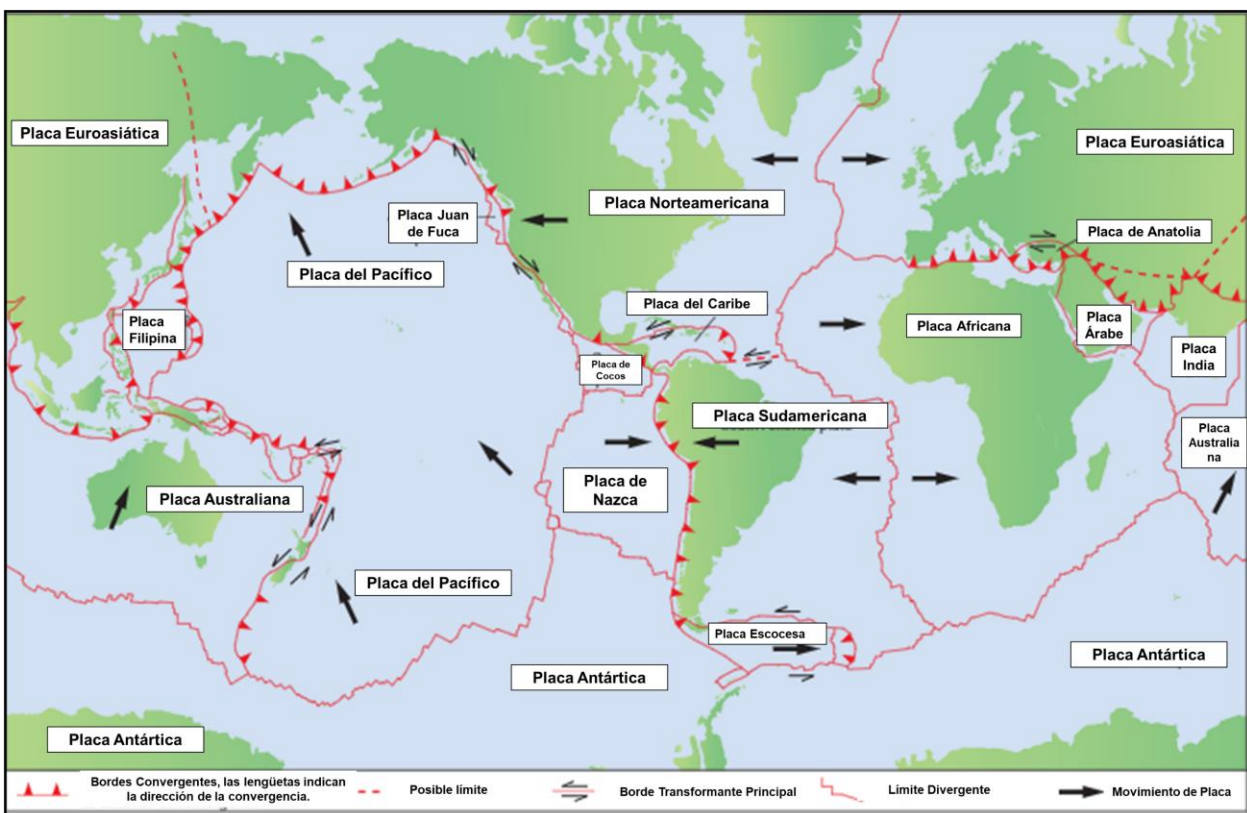


Figura III. 23. Esquema de las principales placas tectónicas (modificada de Bryant et al, 2012).

Entendiendo lo anterior, y considerando que es un parámetro muy complejo que requiere una caracterización profunda una vez que se ha elegido el sitio para el desarrollo del proyecto, en la etapa preliminar en la que se instala este evaluador difuso es necesario abordar esta variable desde lo *conceptual*. En esta tesis se propone el uso de la regionalización sísmica. Esta caracterización (basada en históricos de eventos sísmicos) se plasma en atlas de riesgos sísmicos que permiten a gobiernos establecer medidas de prevención que aminoren las consecuencias de estos fenómenos naturales (Gutiérrez, et al, 2014). Concretamente en esta elaboración se consideran 3 factores: los bienes expuestos (vidas humanas, edificios, carreteras, tuberías, etc.), la vulnerabilidad (indicador de susceptibilidad al daño) y el peligro (probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, ya sea natural o antrópico (CENAPRED, 2014 & Servicio Geológico Mexicano, 2017)).

De los factores previamente mencionadas, el peligro sísmico es el único inamovible, no puede ser influenciado para que la ocurrencia de sismos sea menor, que la magnitud con la que se presenten estos eventos sean de menor intensidad o que su distribución geográfica sea distinta. El procedimiento para la estimación del peligro sísmico implica el análisis de la sismicidad local, lo que implica dividir un territorio en varios volúmenes nombrados fuentes generadoras, para las cuales se supone una tasa constante de generación de temblores. Posteriormente, se determinan los efectos que son producidos por cada una de ellas en un sitio dado aplicando leyes de atenuación que relacionan la magnitud, la posición de la fuente con relación al sitio dado y la intensidad producida. Dichas leyes asumen el principio de que, en la medida que aumenta la distancia a partir de la fuente, la intensidad disminuye.

Recordar que la aplicación de esta herramienta tiene por objetivo la aplicación a cualquier región o país del mundo, con el fin de ilustrar se toma como ejemplo la información de México. En México la regionalización sísmica (**Figura III. 24**) involucra la interacción de cinco placas tectónicas (con límites convergentes y transformantes). La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos de sismos y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% de la gravedad. En contraparte la zona D ocurren con frecuencia temblores de gran magnitud ($M > 7$) y las aceleraciones del terreno pueden ser

superiores al 70% de gravedad. Los niveles de sismicidad y de aceleración propios de las zonas B y C están acotados por los valores correspondientes de A y D, los temblores grandes son poco frecuentes y se estima que las aceleraciones se mantendrán por debajo del 70% de la gravedad (CENAPRED, 2014).

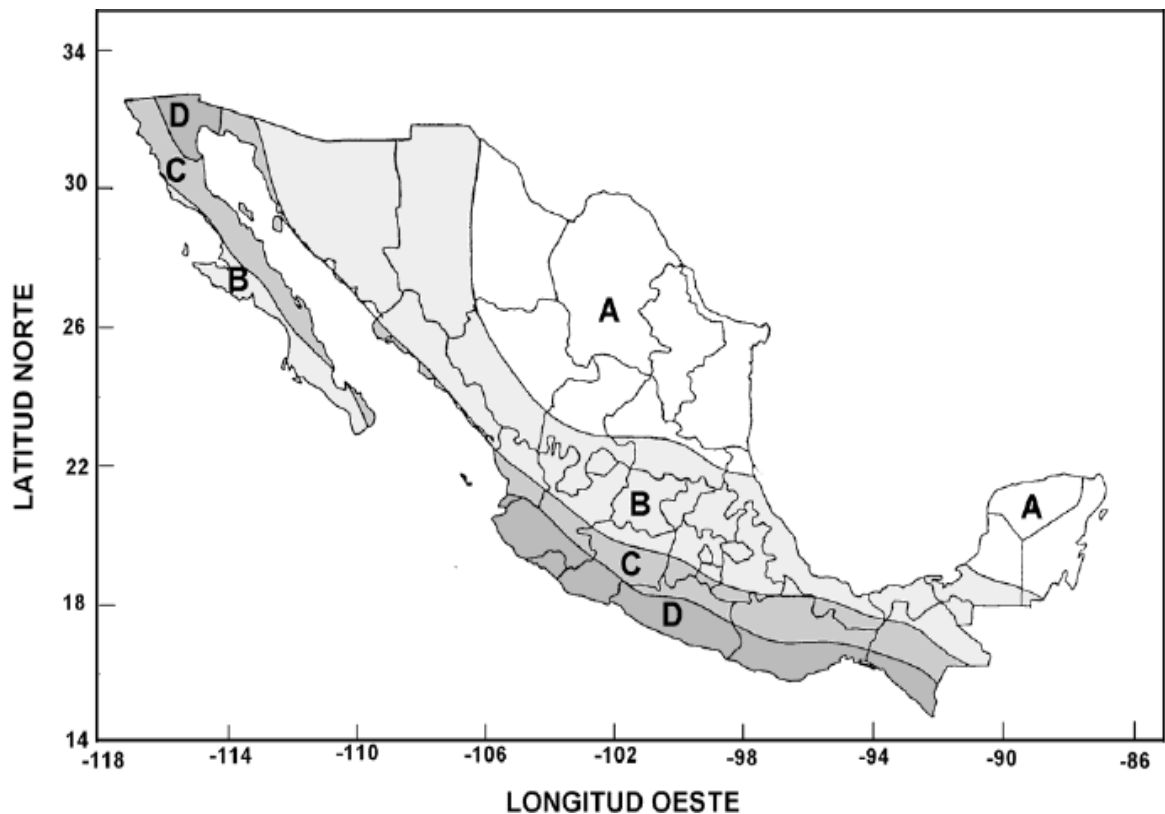


Figura III. 24. Regionalización sísmica de México (tomada de Gutiérrez, et al, 2014)

Para esta versión de evaluador difuso es necesario declarar el método con el que se aborda una variable sin que se considere que es suficiente para estimarla. Un concepto tan complejo como la actividad tectónica, por sí solo, representaría la tarea de un gran sistema inteligente. Para mostrar cómo se aborda este aspecto, se incluye la regionalización sísmica de México para explicar la métrica con base a la geoposición relativa del sitio evaluado respecto a la región de mayor actividad sísmica en el país (zona D). El usuario debe aproximar dentro del rango de [0.1 a 1] la posición del punto en estudio. El 1 se asocia a una posición ubicada en el centro de gravedad de la región D y 0.1 se asocia a la posición más alejada de la región D.

De esta forma los conjuntos difusos para la variable *Tectónica* son: Estable, Moderadamente Estable e Inestable. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto estable está en 0.3 o menos, para moderadamente estable 0.65 y para estable en 0.85 o más (**Figura III. 25**). Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos.

Nota: El valor típico para el conjunto difuso estable (0.3) se asocia a una curva imaginaria intermedia que divide a la región A en partes proporcionales, decreciendo el valor de posición relativo en dirección contraria a la región B y creciendo en dirección a la región B. Para el conjunto moderadamente estable (0.65) se aplicó el mismo procedimiento considerando para este caso la región B, creciendo en valor en dirección a la región C. Finalmente para el conjunto estable (0.85) se consideró una curva intermedia de la región D, creciendo en dirección al límite entre placas más cercano. Esto puede ser interpretado con auxilio de la **Figura III. 26**.

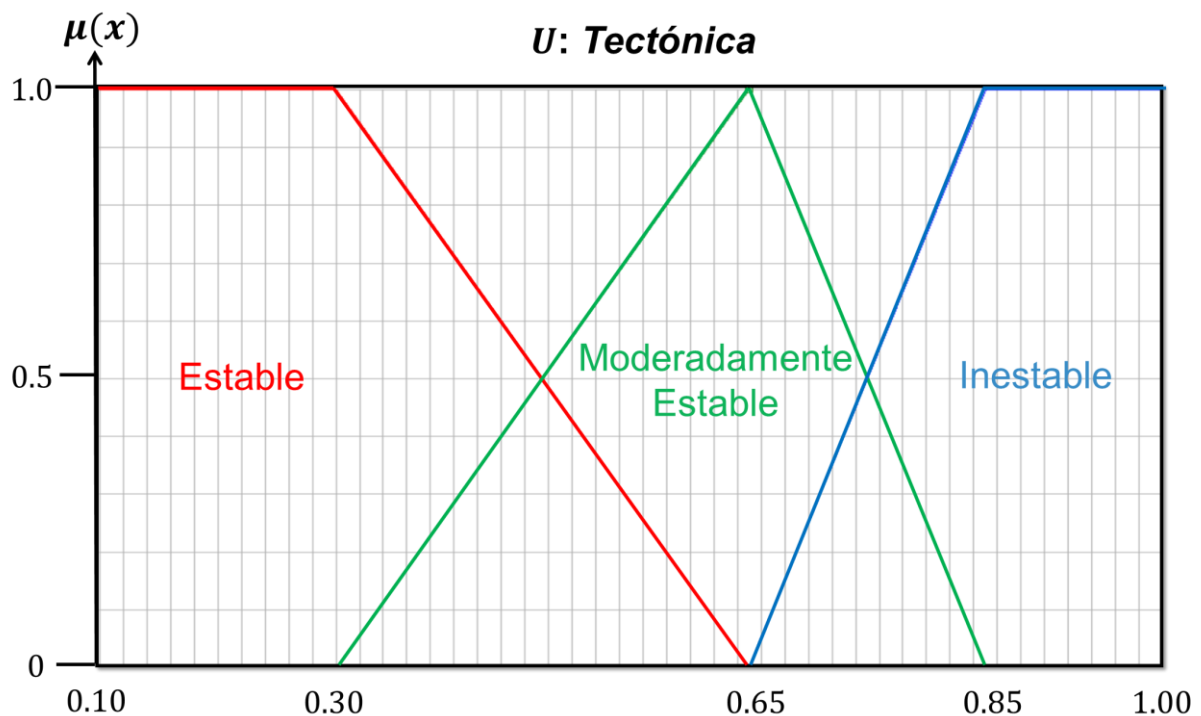


Figura III. 25. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Tectónica*.

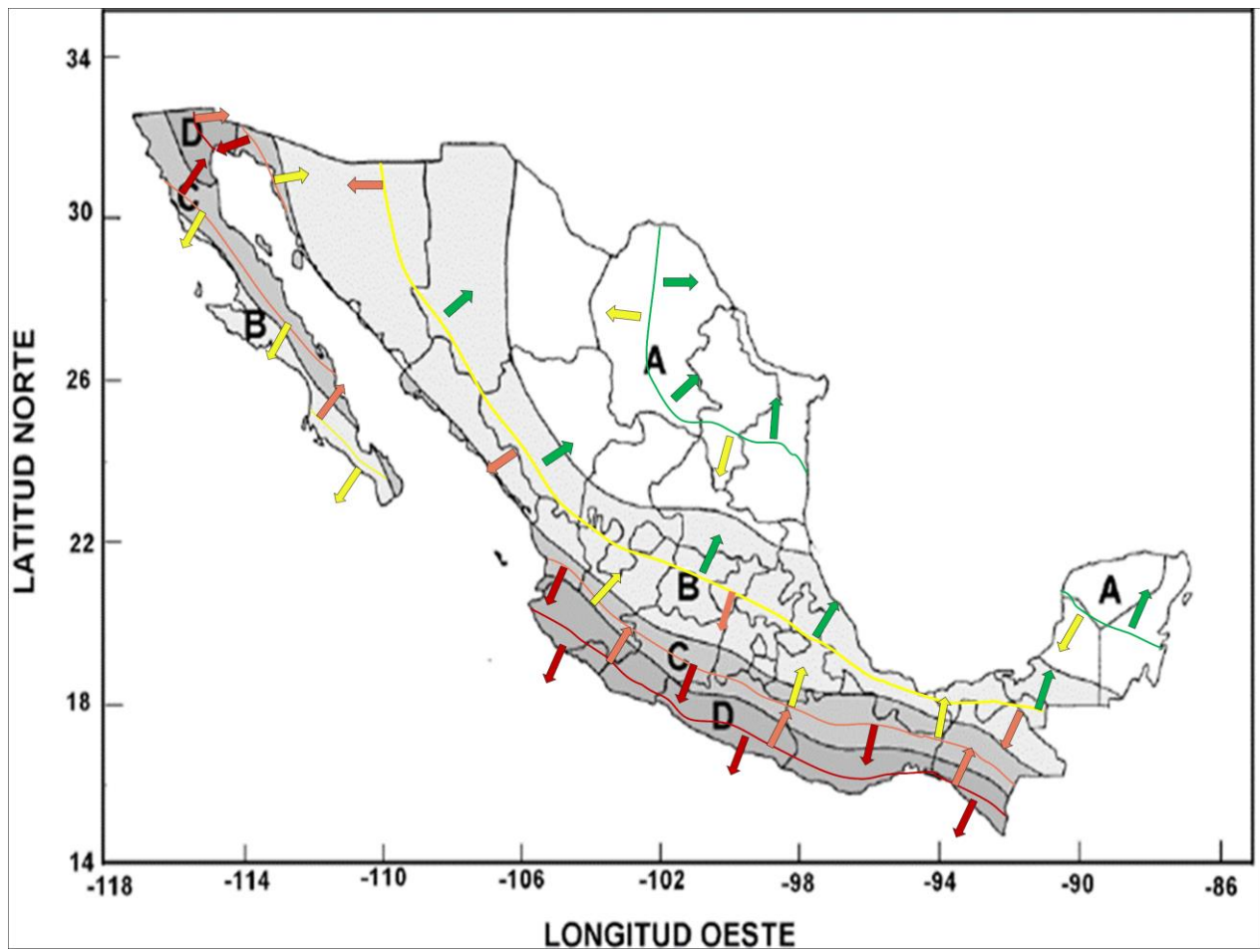


Figura III. 26. Regionalización sísmica de México con ayuda para la aproximación de valores necesarios para el sistema difuso (CENAPRED, 2014).

III.4 Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello.

Esta variable tiene como objetivo caracterizar (de forma aproximada) las formaciones geológicas de acuerdo con su ajuste a las propiedades de porosidad, permeabilidad, continuidad lateral y homogeneidad que exige el almacenamiento del CO₂ (en cantidades importantes) de forma que: i) se facilite la inyección del gas en el medio sin inducir fracturamiento y ii) se garantice la estanqueidad del gas por periodos de tiempo suficientemente largos (Bachu, 2000; CIEMAT,2006). Dada la complejidad del concepto y entendiendo que estas cualidades se definirán con estudios específicos (una vez que se haya elegido el sitio de desarrollo), en esta tesis se proponen 3 sub sistemas para configurar la calificación final. Cada uno de estos esquemas se diseñó para servir a los fines de una aproximación preliminar y se construyeron para que fueran suficientemente flexibles que se adaptaran a los conocimientos parciales de esta etapa de análisis, y bastante robustos ante el peso de estas cargas paramétricas sobre la elección final del sitio. Los sub sistemas propuestos son:

A) Calidad de la formación almacén, cuyas variables de entrada son:

- Porosidad representativa de la formación almacén.
- Permeabilidad representativa de la formación almacén.
- Homogeneidad de la formación almacén.

B) Calidad de la formación sello, cuyas variables de entrada son:

- Porosidad representativa de la formación sello.
- Permeabilidad representativa de la formación sello.
- Homogeneidad de la formación sello.

C) Configuración geométrica de las formaciones:

- Efectividad de la formación sello.
- Continuidad lateral de las formaciones.

De cada sub sistema se obtienen las calificaciones de la *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica de las formaciones* que se someten a la *defuzzificación* para categorizar las *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*. Recuerde que esta salida se convierte en la cuarta entrada del sistema difuso global.

III.4.1 Calidad de la formación almacén

El objetivo de este sub sistema es emitir una calificación sobre la cualidad de las rocas que conforman a la formación candidata a fungir como almacén. A continuación se describen las variables involucradas:

Porosidad representativa de la formación almacén.

La *porosidad* se define como la capacidad de la roca por almacenar fluidos (aire, aceite, gas, agua y vapor de agua) en su volumen de poros. Se caracterizan dos tipos principales de porosidad: absoluta y efectiva. Para la ingeniería de yacimientos la porosidad efectiva es la más importante debido a que determina el volumen de poros interconectados. Para determinar la calidad de las rocas productoras de hidrocarburos, la industria petrolera utiliza la clasificación de porosidad efectividad propuesta por Levorsen en 1973 (Lorenzo, 2018), en esta tesis se utiliza esta clasificación para categorizar el ajuste de las rocas como formación candidata a fungir como almacén, es decir, su susceptibilidad a ser receptoras de un fluido (CO₂ en estado supercrítico):

- Inadecuada: cuando exhibe porosidades de entre 0 a 10 %.
- Apenas Adecuada: cuando exhibe porosidades de entre 10 a 25 %
- Adecuada: cuando exhibe porosidades mayores a 25 %

En regiones donde se han realizado bastas campañas de exploración existen datos sobre múltiples variables siendo una central la *porosidad*. Esta propiedad, con sus marcadas variaciones desde lo regional, es ideal para expresarla en forma difusa, ya que la precisión pierde sentido cuando el fenómeno bajo estudio es extremadamente complejo. En este sub sistema se pide al usuario que indique un valor de *porosidad* y es responsabilidad de éste usar su experiencia, resultados de exámenes a núcleos, una conclusión de ambos, alguna alternativa de formulación semiempírica, etc. Cuando se haya decidido sobre un solo valor representativo, por ejemplo aplicando la ecuación propuesta por Al Arbi (2020) (**Ecuación III. 1**). (o cualquier otra interpretación), este valor se ingresa en la base de variable.

$$\phi_{prom} = \frac{\sum \phi_i h_i}{\sum h_i} \quad \dots\dots\dots \quad \text{(Ecuación III. 1)}$$

Donde:

ϕ_i , es la porosidad de la muestra i

h_i , es el espesor de la muestra i

Para la variable lingüística *Porosidad representativa de la formación almacén* se usan las funciones: Inadecuada, Apenas Adecuada y Adecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto inadecuada está en 5 por ciento o menos, para apenas adecuada en 15 por ciento y para adecuada en 25 por ciento o más (**Figura III. 27**). Para una *Porosidad representativa de la formación almacén* superior a 30 e inferior a 1 (sin ser 0 absoluto) basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

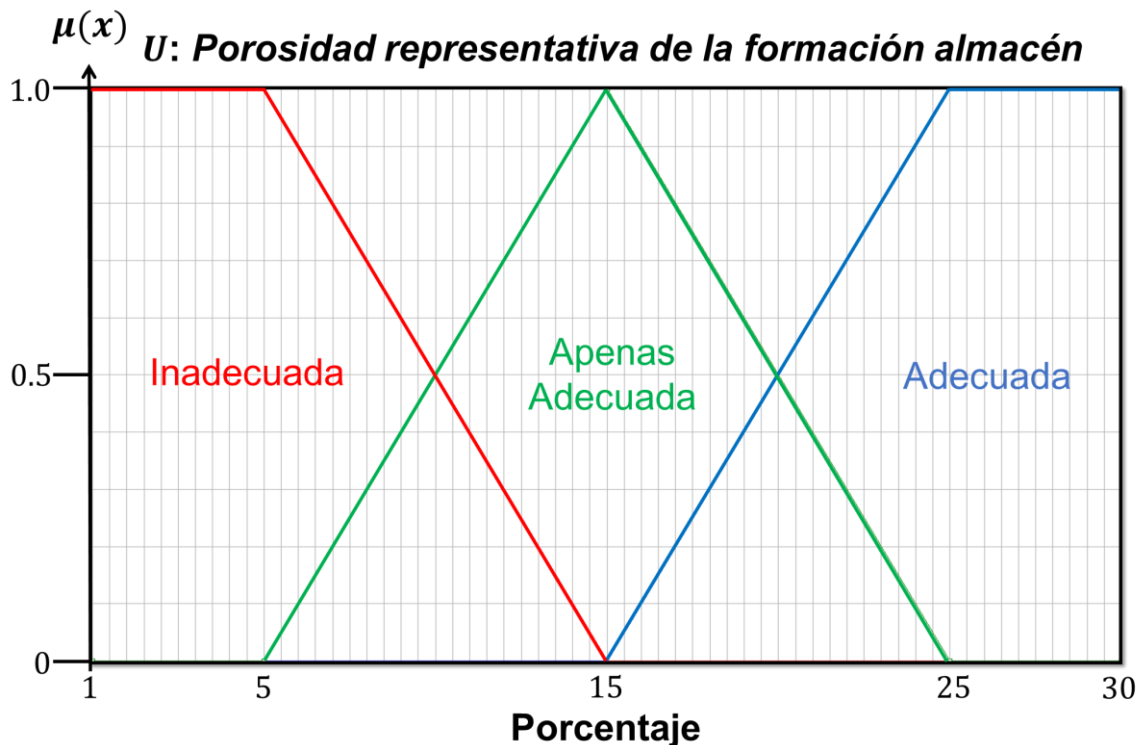


Figura III. 27. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Porosidad representativa de la formación almacén*.

Permeabilidad representativa de la formación almacén.

La *permeabilidad* se entiende como la propiedad del medio poroso que mide la capacidad y la habilidad de la formación a transmitir fluidos, guardando relación directa con la porosidad efectiva. La permeabilidad de la roca, k , es muy importante debido a que controla el movimiento direccional y la velocidad de flujo de los fluidos del yacimiento en la formación. Para determinar la calidad de las rocas productoras de hidrocarburos, la industria petrolera utiliza la clasificación de permeabilidad propuesta por Levorsen en 1973 (Lorezo, 2018), en esta tesis se utiliza esta clasificación para categorizar el ajuste de las rocas como formación candidata a fungir como almacén, es decir, su susceptibilidad a ser receptoras de un fluido (gas CO_2) y permitir el adecuado flujo de fluidos dentro del medio:

- Inadecuada: la permeabilidad es de 1 a 10 mD
- Apenas Adecuada: la permeabilidad es de 10 a 100 mD
- Adecuada: la permeabilidad es mayor a 100 mD

El valor de *permeabilidad* de entrada es responsabilidad del usuario y el conocimiento, experiencia, resultados de exámenes a núcleos, y toda la información que tenga a mano. Cuando se haya decidido sobre un solo valor representativo, por ejemplo aplicando la ecuación propuesta por Al Arbi (2020) (**Ecuación III. 2**). (o cualquier otra interpretación), este valor se ingresa en la base de variable. Es importante señalar que este sistema difuso se construye flexible por lo que se recomienda hacer simulaciones sobre una gran variedad de valores si esta propiedad es incierta (sobre los valores de campo).

$$k_{prom} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i \times \ln(k_i)}{\sum_{i=1}^n h_i}\right) \dots\dots\dots (\mathbf{Ecuación III. 2})$$

Donde:

k_i , es la permeabilidad de la muestra i n , es el número total de muestras.

h_i , es el espesor de la muestra i

Los conjuntos difusos de la variable lingüística *Porosidad representativa de la formación almacén* son: Inadecuada, Apenas Adecuada y Adecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto inadecuada está en 10 mD (mili Darcy) o menos, para apenas adecuada en 60 mD y para adecuada en 100 mD o más (**Figura III. 28**).

Para una *Permeabilidad representativa* superior a 120 o inferior a 1 mD (sin ser 0 absoluto) basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

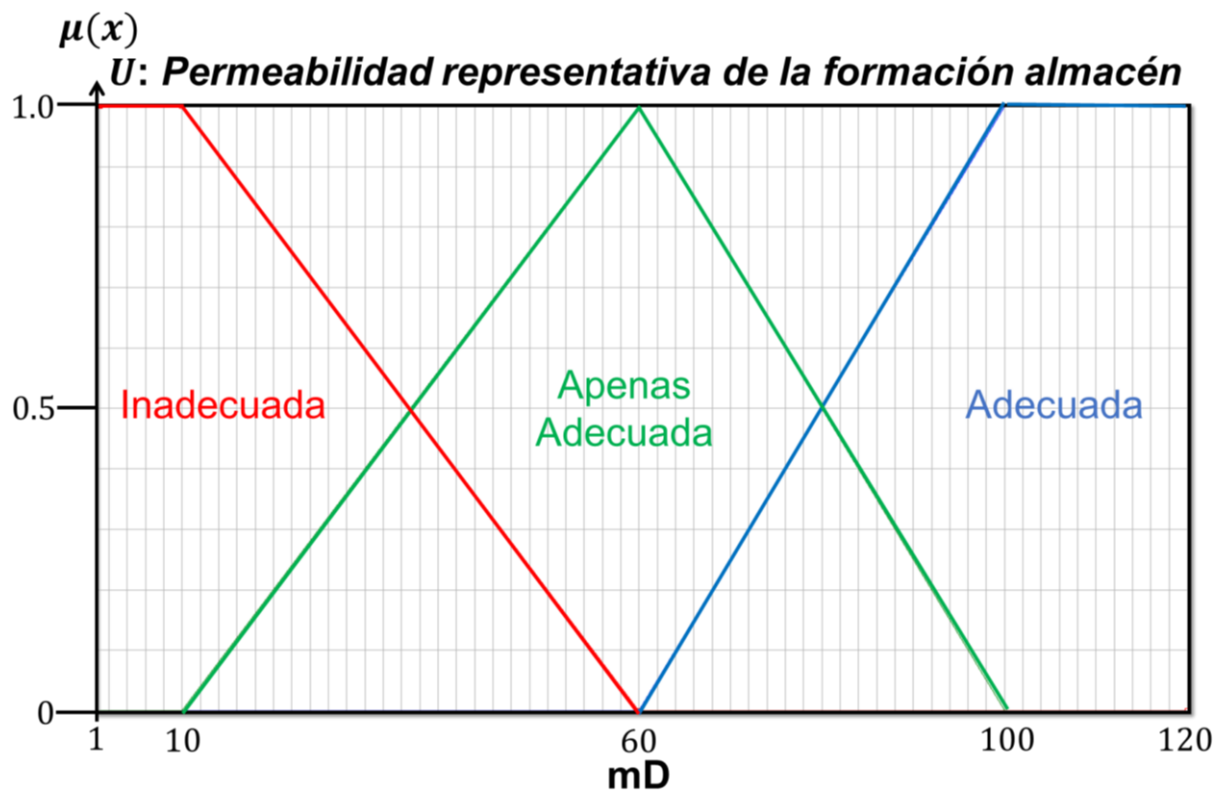


Figura III. 28. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Permeabilidad representativa de la formación almacén*.

Homogeneidad de la formación almacén

La tercera variable que constituye a este sub sistema es la *Homogeneidad de la formación almacén* respecto a la litología predominante (se prefiere que la formación esté constituida principalmente por areniscas y/o calizas). Las areniscas se consideran las rocas sedimentarias de mayor porosidad y permeabilidad. Por su parte las calizas suelen presentar una baja porosidad primaria sin embargo, tienden a tener una alta porosidad secundaria, bien por fracturamiento o por disolución, (CIEMAT, 2006; CONAMA, 2008).

La *Homogeneidad de la formación almacén* (H_{FA}), se expresa como:

$$(\%) H_{FA} = \frac{H_{A\ y/o\ C}}{H_{FC}} \times 100 \quad \dots\dots\dots \quad \textbf{(Ecuación III. 3)}$$

Donde 100% significa que el paquete considerado está totalmente compuesto de areniscas y/o calizas y 0% es que no contiene estos materiales. El autor de esta tesis reconoce que las intercalaciones podrían dar resultados engañosos y alerta al usuario a sacrificar el valor si se considera que algo así podría estar sucediendo.

Con base en esta información se construyen los conjuntos difusos de la variable lingüística *Homogeneidad de la formación almacén*: Insuficiente, Apenas Suficiente y Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto insuficiente está en 15 por ciento o menos, para apenas suficiente en 50 por ciento y para suficiente está en 80 por ciento o más (**Figura III. 29**).

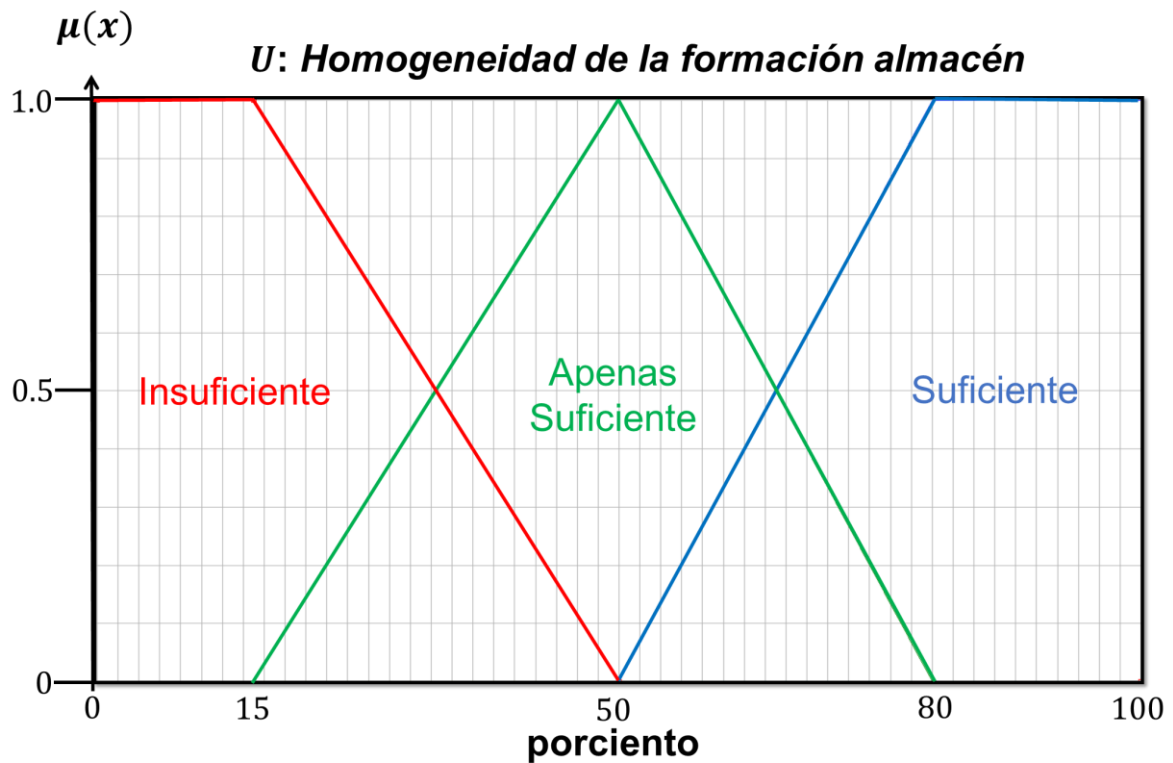


Figura III. 29 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Homogeneidad de la formación almacén*.

Salida: Calidad de la formación almacén

Con las tres variables de entrada (*Porosidad representativa de la formación almacén*, *Permeabilidad representativa de la formación almacén* y *Homogeneidad de la formación almacén*) es posible definir la *Calidad de la formación almacén*. Los conjuntos difusos para esta variable lingüística de salida son Mala, Buena y Muy Buena. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto mala están en 15 por ciento o menos, buena en 40 por ciento y para muy buena en 65 por ciento o más (**Figura III. 30**).

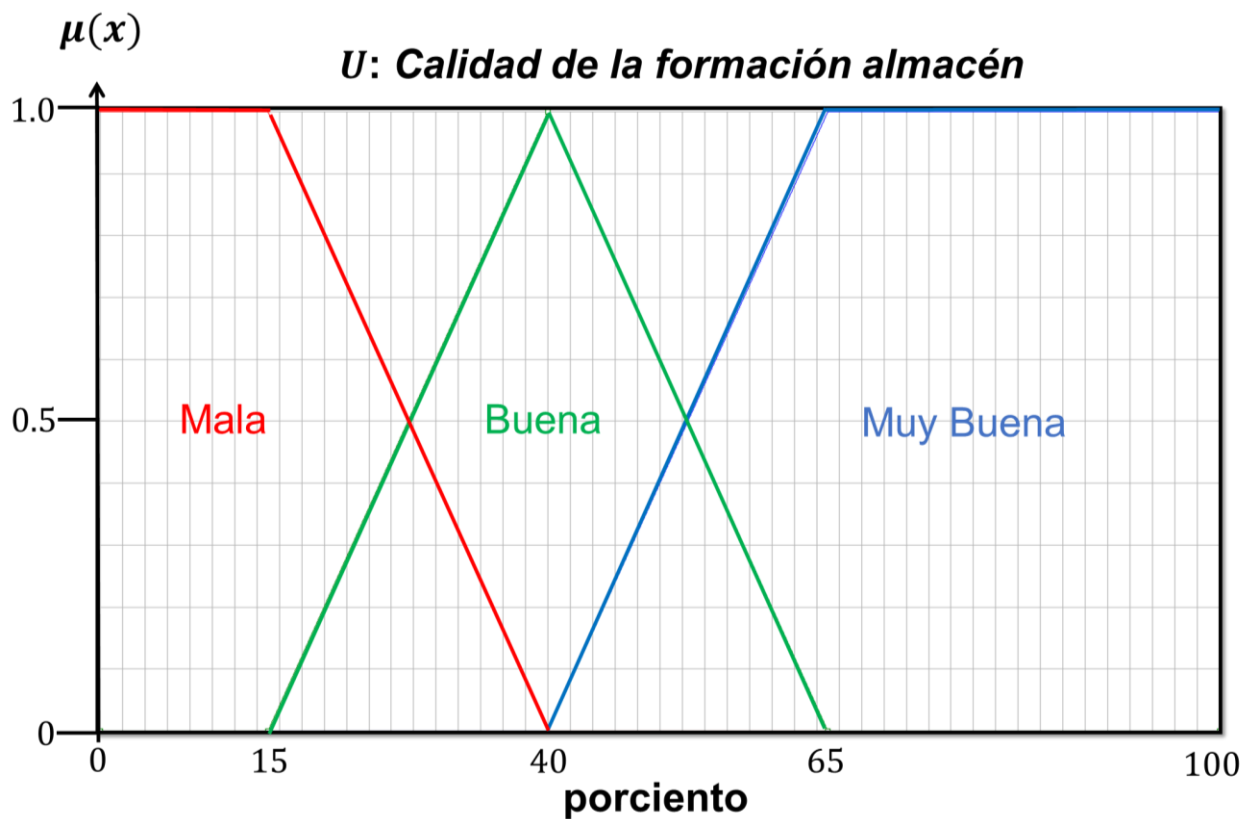


Figura III. 30 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Calidad de la formación almacén*

Resumiendo, este subsistema cuenta con 3 variables de entrada (*Porosidad representativa de la formación almacén*, *Permeabilidad representativa de la formación almacén* y *Homogeneidad de la formación almacén*), una variable de salida (*Calidad de la formación almacén*) y un bloque de reglas compuesto por 81 reglas posibles, de las cuales 48 tienen un DoS de 0, y 33 un DoS de 1. En la **Tabla III. 4** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si- Entonces.

Tabla III. 4. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Calidad de la formación almacén*.

Regla		Porosidad		Permeabilidad		Homogeneidad		Calidad formación almacén	DoS
1	SI	Inadecuada	Y	Inadecuada	Y	Insuficiente	ENTONCES	Mala	1.0
81	SI	Adecuada	Y	Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	1.0
41	SI	Apenas Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Buena	1.0
78	SI	Adecuada	Y	Adecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	1.0
68	SI	Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Buena	1.0
3	SI	Inadecuada	Y	Inadecuada	Y	Insuficiente	ENTONCES	Muy Buena	0.0
78	SI	Adecuada	Y	Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Mala	0.0
72	SI	Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	0.0
38	SI	Apenas Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Insuficiente	ENTONCES	Buena	0.0

III.4.2 Calidad de la formación sello

El objetivo de este sub sistema es emitir una calificación sobre la cualidad de las rocas que conforman a la formación candidata a fungir como sello. A continuación se describen las variables involucradas.

Porosidad representativa de la formación sello.

La *porosidad* se define como la relación entre el volumen poroso y el volumen total de roca, sus unidades de medida son la fracción de volumen [0-1] y el porcentaje [0-100]. La calidad de las rocas productoras de hidrocarburos ha sido clasificada con base en su permeabilidad con la clasificación propuesta por Levorsen en 1973 (Lorenzo, 2018), en esta tesis se usa esta clasificación para categorizar el ajuste de las rocas como formación barrera, suficientemente poco porosa e impermeable, que impida la fuga de CO₂ (dicha clasificación será inversa a la de la *porosidad representativa de la formación almacén*):

- Adecuada: cuando exhibe porosidades de entre 0 a 10 %.
- Apenas Adecuada: cuando exhibe porosidades de entre 10 a 25 %
- Inadecuada: cuando exhibe porosidades mayores a 25 %

En este sub sistema se pide al usuario que indique un valor de *porosidad* y es responsabilidad de éste usar su experiencia sobre, resultados de exámenes a núcleos o, información de registros de pozos o una combinación de ambos, alguna alternativa de formulación semiempírica, etc.

Los conjuntos difusos de la variable lingüística *Porosidad representativa de la formación sello* son: Adecuada, Apenas Adecuada e Inadecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto adecuada está en 5 por ciento o menos, para apenas adecuada en 10 por ciento y para inadecuada en 15 por ciento o más (**Figura III. 31**). Para una *Porosidad representativa de la formación sello* superior a 20 o inferior a 1 por ciento basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

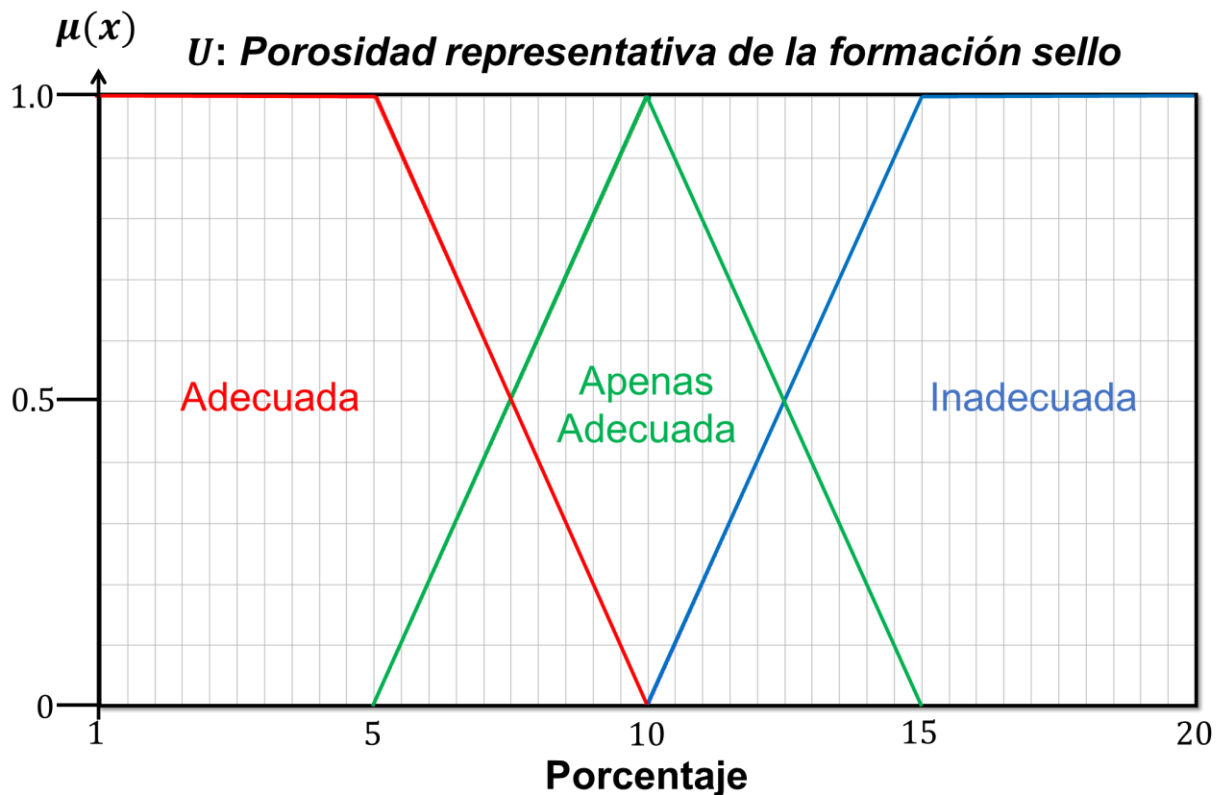


Figura III. 31 Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Porosidad representativa de la formación sello*.

Permeabilidad representativa de la formación sello.

Nuevamente se hará uso de la clasificación de rocas productoras con base en su *permeabilidad* propuesta por Levorsen (Lorenzo, 2018) para categorizar el ajuste de las rocas como formación que sea una barrera suficientemente impermeable y que impida el flujo de fluidos dentro del medio, de tal forma que impida la fuga del CO_2 (dicha clasificación será inversa a la de *permeabilidad representativa de la formación almacén*):

- Adecuada: la permeabilidad es de 1 a 10 mD
- Apenas Adecuada: la permeabilidad es de 10 a 100 mD
- Inadecuada: la permeabilidad es mayor a 100 mD

En este subsistema al igual que en la variable previa se pide al usuario que indique un valor de *permeabilidad*. Los conjuntos difusos para la variable lingüística *Permeabilidad representativa de la formación sello*: Adecuada, Apenas Adecuada e Inadecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto adecuada está en 5 mD o menos, para apenas adecuada en 10 mD y para inadecuada en 15 mD o más (**Figura III. 32**). Para una *Permeabilidad representativa de la formación sello* superior a 20 o inferior a 1 (sin ser 0 absoluto) basta con asignar el valor típico máximo.

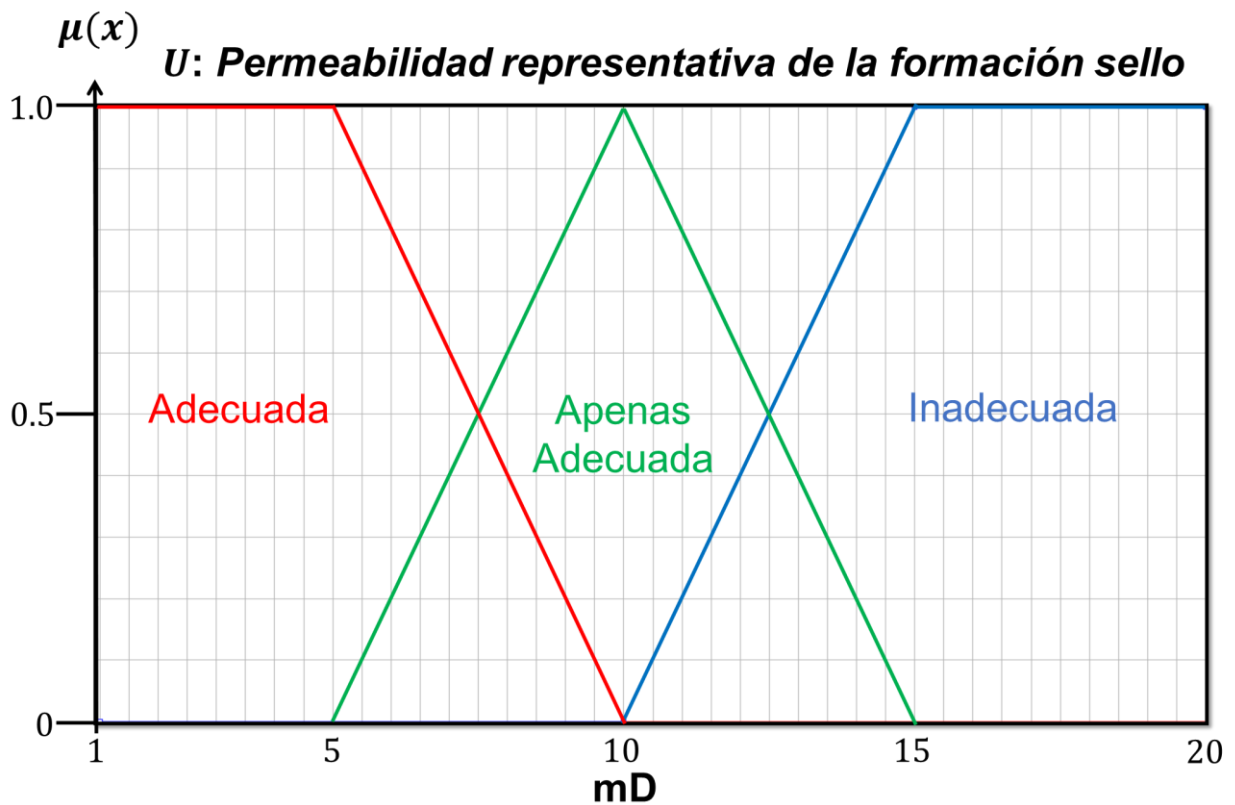


Figura III. 32. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Permeabilidad representativa de la formación sello*.

Homogeneidad de la formación sello.

La tercer variable que constituye a este sub sistema es la *Homogeneidad de la formación sello* respecto a la litología predominante, se busca este constituida principalmente por lutitas, arcillas y/o rocas evaporíticas; estas rocas reúnen buenas condiciones de sellado por su pequeño tamaño de poro que requiere presiones capilares altas para saturar la roca y transmitir los fluidos (CIEMAT, 2006; CONAMA, 2008).

La *Homogeneidad de la formación sello* (H_{FS}), se expresa como:

$$(\%) H_{FS} = \frac{H_{Ar,L y/o E}}{H_{FC}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots \quad \text{(Ecuación III. 4)}$$

Donde 100% significa que el paquete considerado está totalmente compuesto de arcillas, lutitas y/o rocas evaporíticas y 0% es que no contiene estos materiales. El autor de esta tesis reconoce que las intercalaciones podrían dar resultados engañosos y alerta al usuario a sacrificar el valor si se considera que algo así podría estar sucediendo.

Con base en esta información se construyen los conjuntos difusos de la variable lingüística *Homogeneidad de la formación sello*: Baja, Apenas Suficiente y Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto baja está en 15 por ciento o menos, para apenas suficiente en 50 por ciento y para suficiente está en 80 por ciento o más (**Figura III. 33**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos.

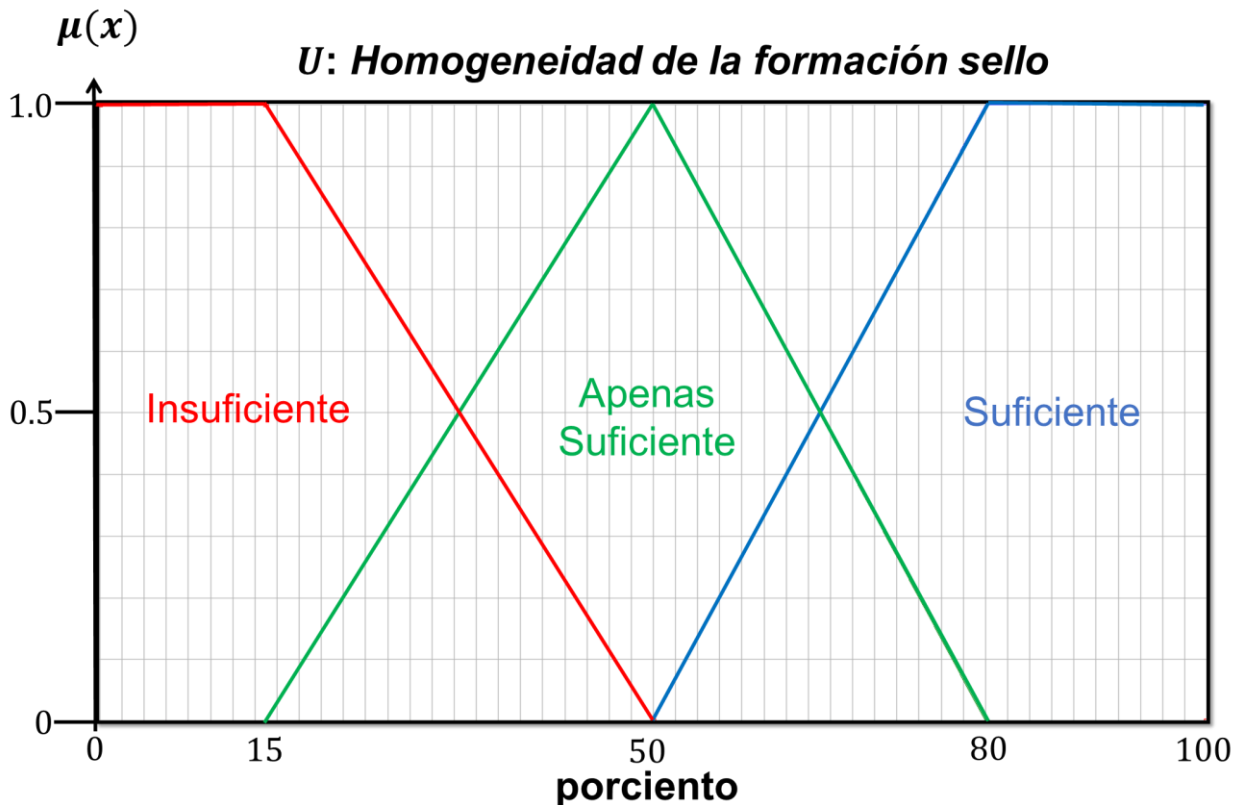


Figura III. 33. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Permeabilidad representativa*.

Salida: Calidad de la formación sello

Con las tres variables de entrada (*Porosidad representativa de la formación sello*, *Permeabilidad representativa de la formación sello* y *Homogeneidad de la formación sello*) es posible definir la *Calidad de la formación sello*. Los conjuntos difusos para esta variable lingüística de salida son: Mala, Buena y Excelente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto mala están en 25 por ciento o menos, buena en 50 por ciento y para excelente en 75 por ciento o más (**Figura III. 34**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos

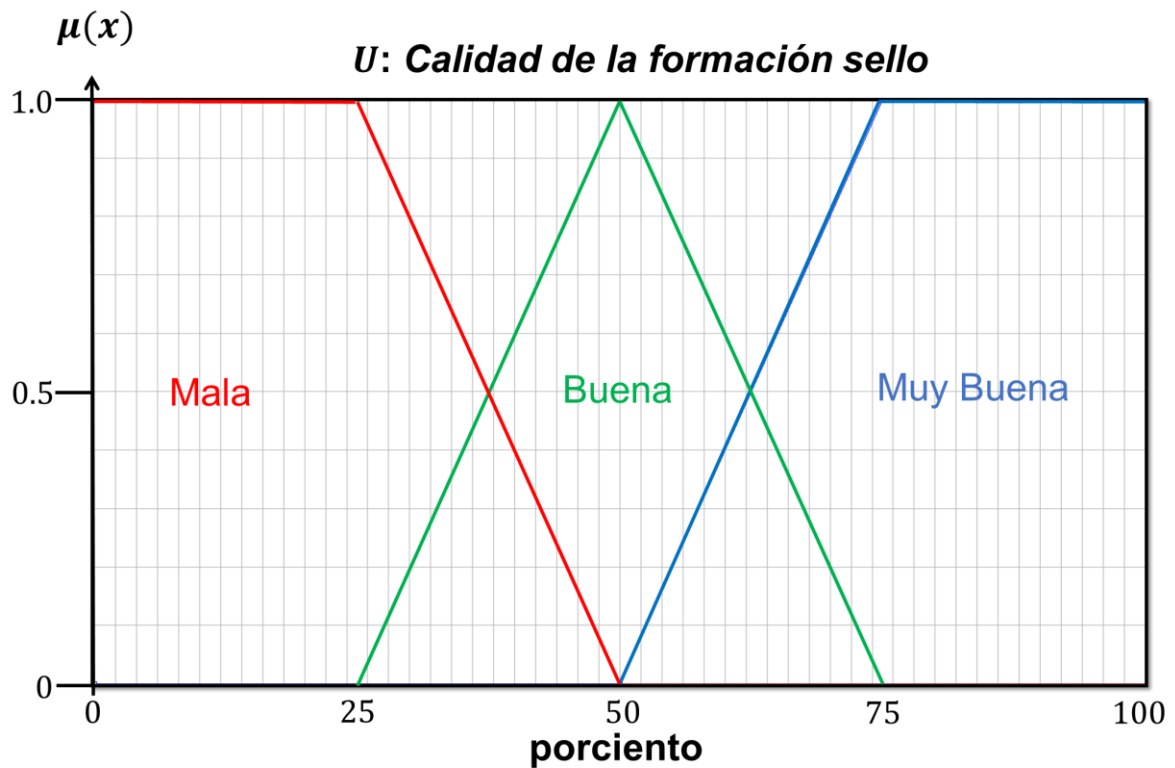


Figura III. 34. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Calidad de la formación sello*.

Resumiendo, este sub sistema se estructura en 3 variables de entrada (*Porosidad representativa de la formación sello*, *Permeabilidad representativa de la formación sello* y *Homogeneidad de la formación sello*), una variable de salida (*Calidad de la formación sello*) y un bloque de reglas compuesto por 81 reglas posibles, de las cuales 50 tienen un DoS de 0 y 31 un DoS de 1. En la **Tabla III. 5** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si- Entonces.

Tabla III. 5. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Calidad de la formación sello*.

Regla		<i>Porosidad</i>		<i>Permeabilidad</i>		<i>Homogeneidad</i>		<i>Calidad formación sello</i>	DoS
3	SI	Adecuada	Y	Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	1.0
79	SI	Inadecuada	Y	Inadecuada	Y	Insuficiente	ENTONCES	Mala	1.0
44	SI	Apenas Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Buena	1.0
32	SI	Apenas Adecuada	Y	Adecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Buena	1.0
18	SI	Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	1.0
62	SI	Inadecuada	Y	Adecuada	Y	Suficiente	ENTONCES	Buena	1.0
78	SI	Inadecuada	Y	Inadecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	0.0
48	SI	Apenas Adecuada	Y	Inadecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Muy Buena	0.0
31	SI	Apenas Adecuada	Y	Adecuada	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Mala	0.0
38	SI	Adecuada	Y	Apenas Adecuada	Y	Insuficiente	ENTONCES	Buena	0.0

III.4.3 Configuración geométrica de las formaciones

Las formaciones geológicas además de ajustarse a límites sobre *porosidad*, *permeabilidad* y *homogeneidad* para ser considerados en el almacenamiento geológico de CO₂, deben presentar cierta configuración geométrica: La formación sello, por ejemplo, además de ser impermeable debe encontrarse a techo y a muro de la formación almacén. De no presentarse esta condición existe un riesgo importante de que ocurran fugas de CO₂ no deseados a superficie (CIEMAT, 2006). La formación sello debe tener carácter regional y ser litológicamente uniforme, especialmente en su base (IPCC, 2005). En este análisis debe tomarse un segundo criterio condicionante que es la continuidad lateral (espacial congruente) de la formación almacén y sello.

Para lo anterior se considera que el análisis geométrico directo de las formaciones es la manera más simple de aproximarse. El usuario deberá recurrir a su experiencia, a herramientas y técnicas como las correlaciones estratigráficas, registros geofísicos, núcleos de pozo así como secciones sísmicas, para definir las distribución y obtener una vista comparable entre formaciones (Del Moral, 2013; Caja, 2017).

Esta variable se compone de dos entradas: *Cobertura a techo* y *Cobertura a muro*.

Cobertura a techo

Se propone estimar con una relación simple un valor relativo de tamaños de unidades.

Se siguen los siguientes pasos:

1. Determinar (aproximadamente) la extensión-área de las formaciones (almacén y sello).
2. Coloque sobre las áreas almacén y sello una “malla” de figuras geométricas (preferentemente cuadrados) simples y con un tamaño representativo -relativo a las áreas totales en análisis.
3. Cuenten el número de parches que completan a cada formación y calcule:

$$Cobertura\ a\ techo = \frac{\#Parches\ sello}{\#Parches\ almacén} \quad \dots(Ecuación\ III.\ 5)$$

4. El valor obtenido es el que deberá ingresarse en la base de la variable. Se entiende que el valor debe ser siempre muy cercano o por sobre la unidad.

Un sencillo ejemplo se ilustra en la **Figura III. 35** y **Figura III. 36**, donde se han identificado las extensiones de área de las formaciones almacén y sello, se ha obtenido que la formación almacén se configura por 54 cuadrados y la formación sello se configura en 69 cuadrados; de esta forma el valor por ingresar en la variable: *Cobertura a techo* es de 1.27.

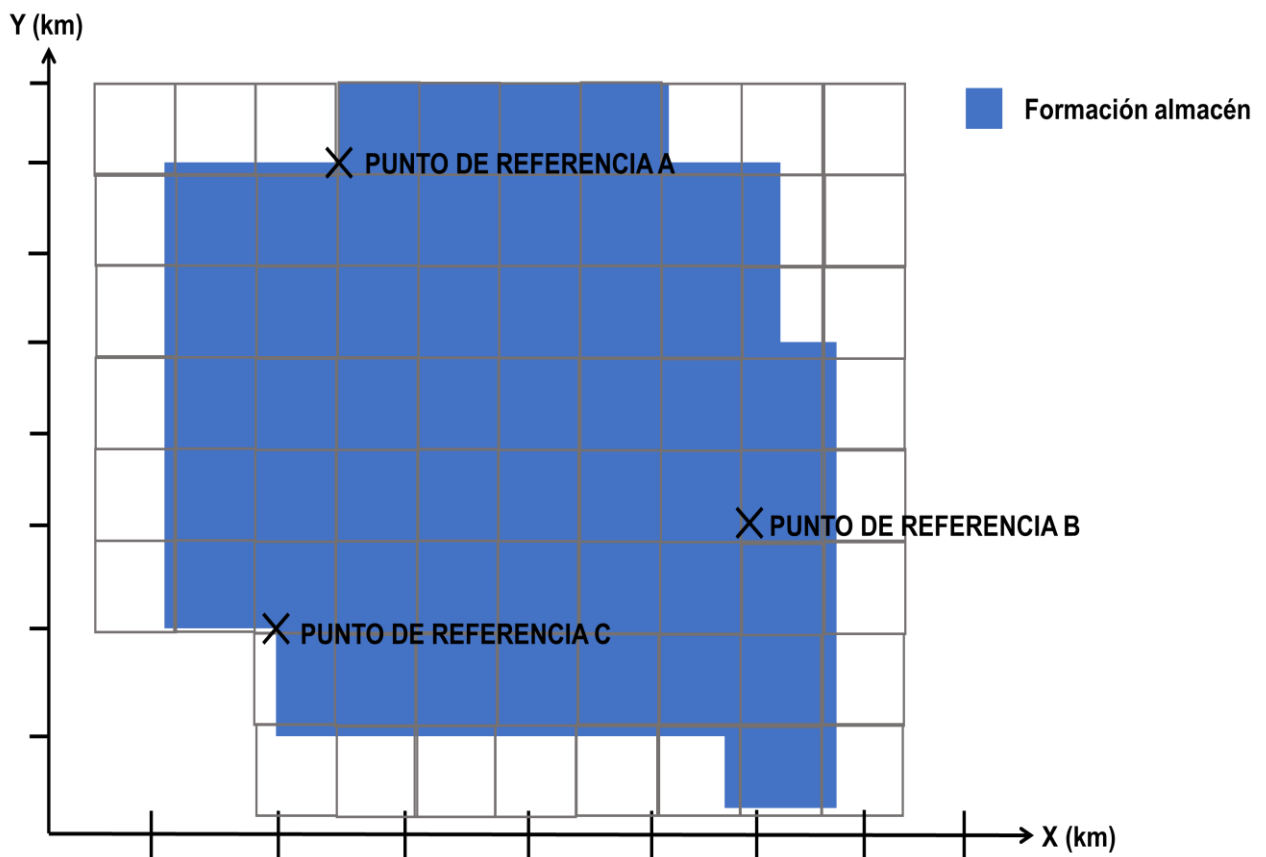


Figura III. 35. Ejemplo ilustrativo para el *enmallado* de la formación almacén

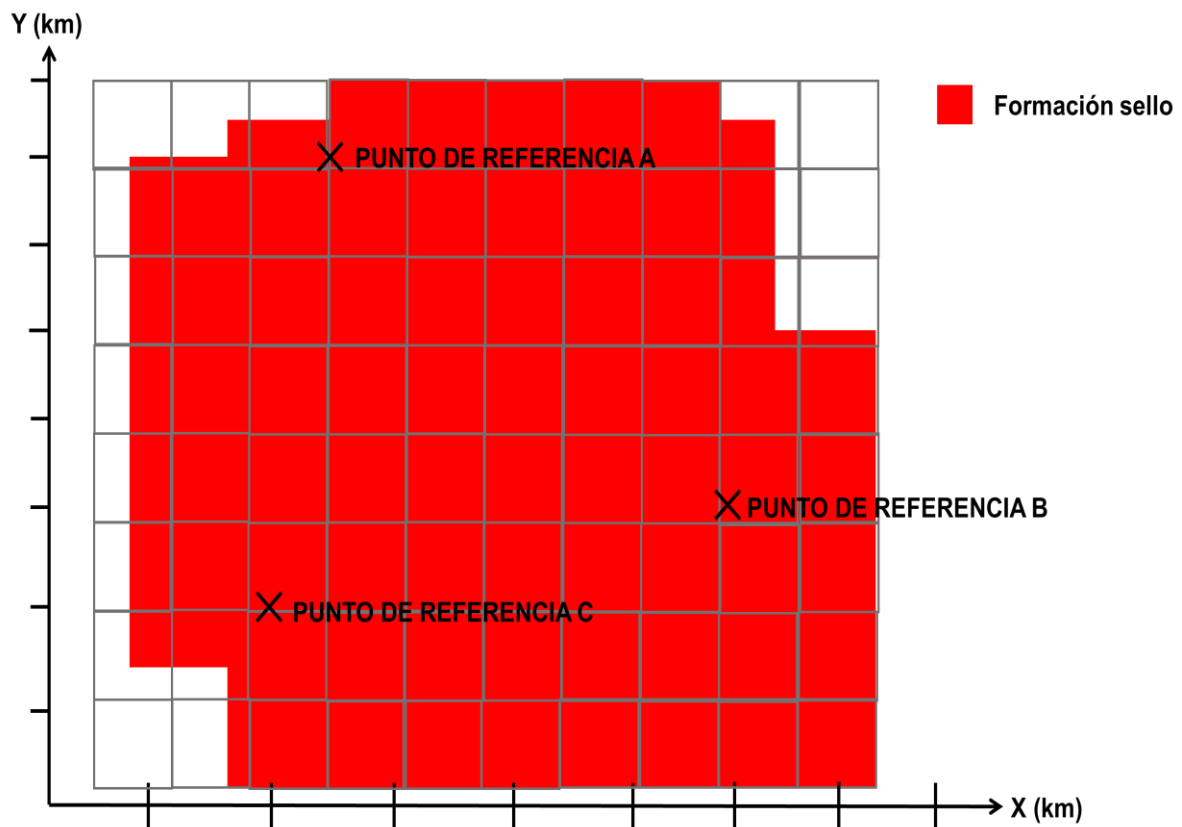


Figura III. 36. Ejemplo ilustrativo para el *enmallado* de la formación sello.

De esta forma los conjuntos difusos para la variable lingüística *Cobertura a techo* son: Insuficiente, Apenas Suficiente, Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto insuficiente están en 1 o menos, apenas suficiente en 1.25 y para suficiente en 1.5 por ciento o más (**Figura III. 37**).

Nota: Al conjunto Insuficiente se le agrega el término Prohibitiva, debido a que de presentarse esta condición el proyecto debería prohibirse.

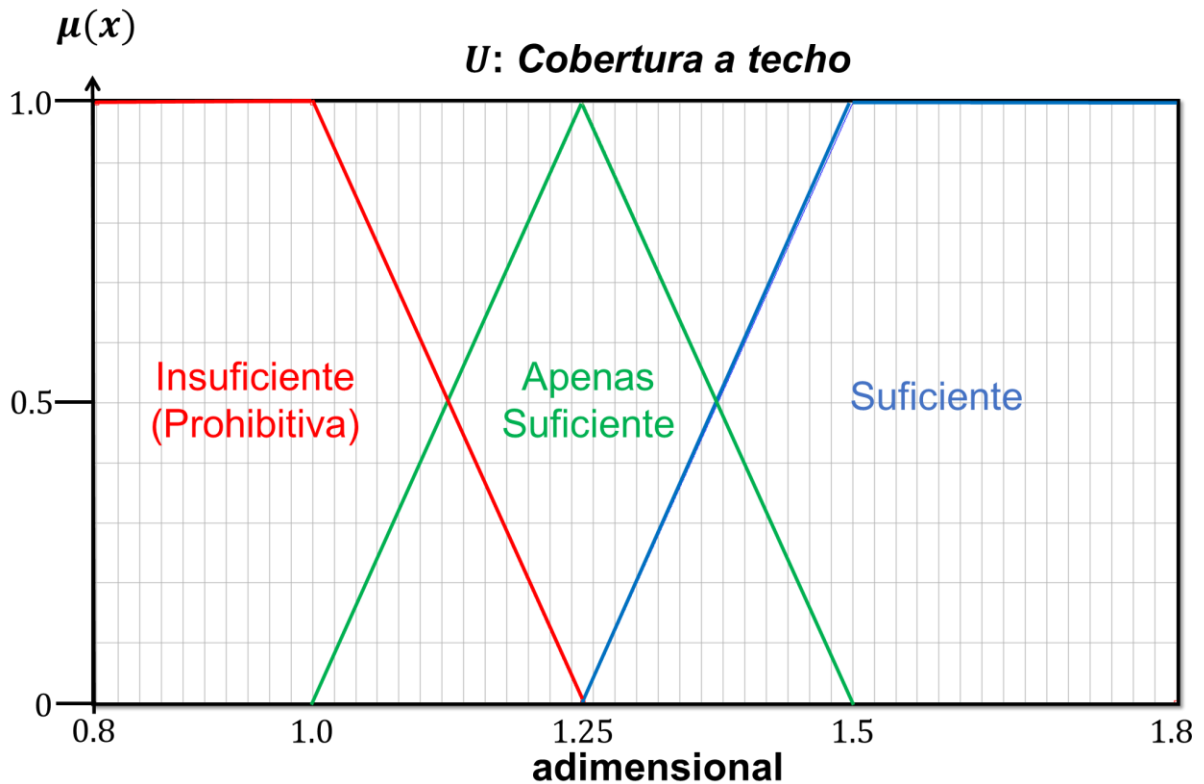


Figura III. 37. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Efectividad de la formación sello*.

Cobertura a muro.

La *cobertura a techo* es una condición que debe cumplirse en su totalidad, es decir no puede realizarse un proyecto en ausencia de esta condición. Por su parte la *Cobertura* de la formación almacén *a muro* de la formación sello es un factor que debe cumplirse sin embargo presenta cierta flexibilidad, por ejemplo puede no presentarse una totalidad de formación sello a muro de la formación almacén, pero si la extensión del sello a techo es notoriamente más grande que la extensión del almacén aún puede realizarse un proyecto de almacenamiento geológico.

1. El proceso para la obtención de este valor es semejante al de cobertura a techo pero la malla se coloca en los contornos (corte) de las formaciones relacionadas.

$$Cobertura\ a\ muro = \frac{\#Parches\ muro - sello}{\#Parches\ corte - formación - almacén} \quad \dots(Ecuación\ III.\ 6) \quad Un$$

sencillo ejemplo se ilustra en la **Figura III. 38**, en la cual se ha identificado el contorno de la formación almacén configurado por 36 cuadrados y dentro de estos 29 representan zonas en donde existen formaciones capaces de fungir como sello, de esta forma el valor por ingresar en la variable: *Cobertura a muro* es de 0.805.

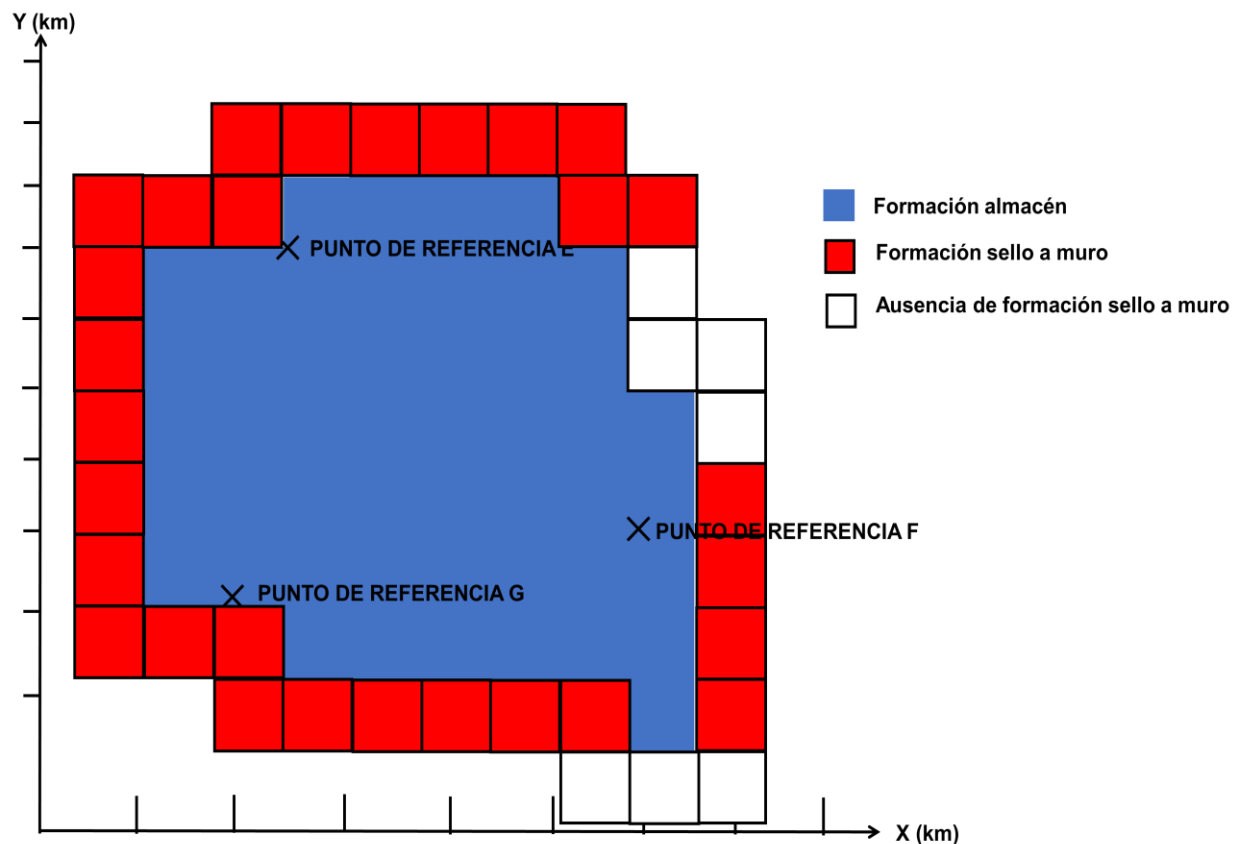


Figura III. 38. Ejemplo ilustrativo para el *enmallado* de la variable *Cobertura a muro*.

Con base en esta información los conjuntos difusos para la variable lingüística *Cobertura a muro* son: *Insuficiente*, *Apenas Suficiente*, *Suficiente*. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto heterogénea están en 0.25 o menos, moderadamente homogénea en 0.60 por ciento y para homogénea en 0.85 por ciento o más (**Figura III. 39**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos

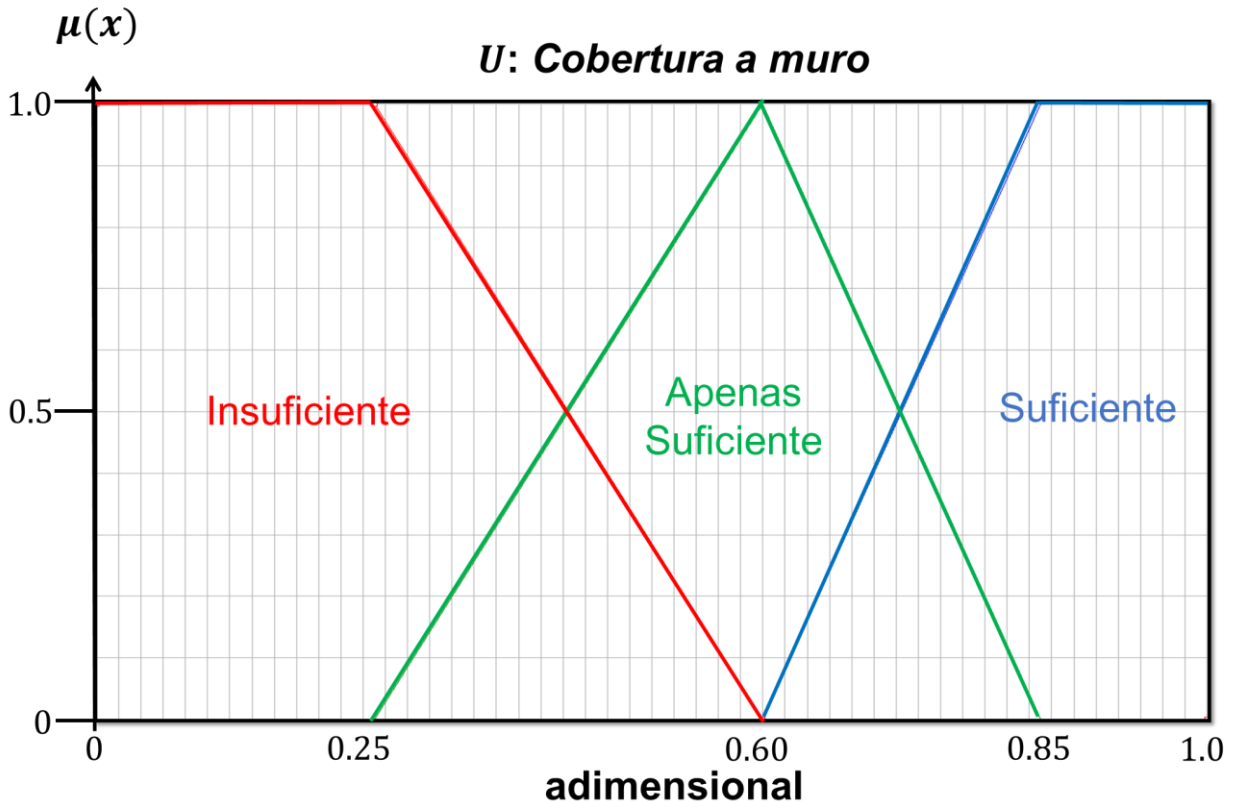


Figura III. 39. Ejemplo de enmallado para la obtención del valor relativo para la variable *Continuidad lateral de las formaciones*.

Salida: Configuración geométrica de las formaciones.

Con las dos variables de entrada (*Cobertura a techo* y *Cobertura a muro*) es posible definir la *Configuración geométrica de las formaciones*. Los conjuntos difusos para esta variable lingüística de salida son De alto riesgo, Efectiva y Muy Efectiva. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto inadecuada están en 30 por ciento o menos, apenas adecuada en 50 por ciento y para adecuada en 80 por ciento o más (**Figura III. 40**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos

Si la clase De alto riesgo se presenta en máxima pertenencia el proyecto debe denegarse, supone un alto riesgo de fuga de gas CO₂.

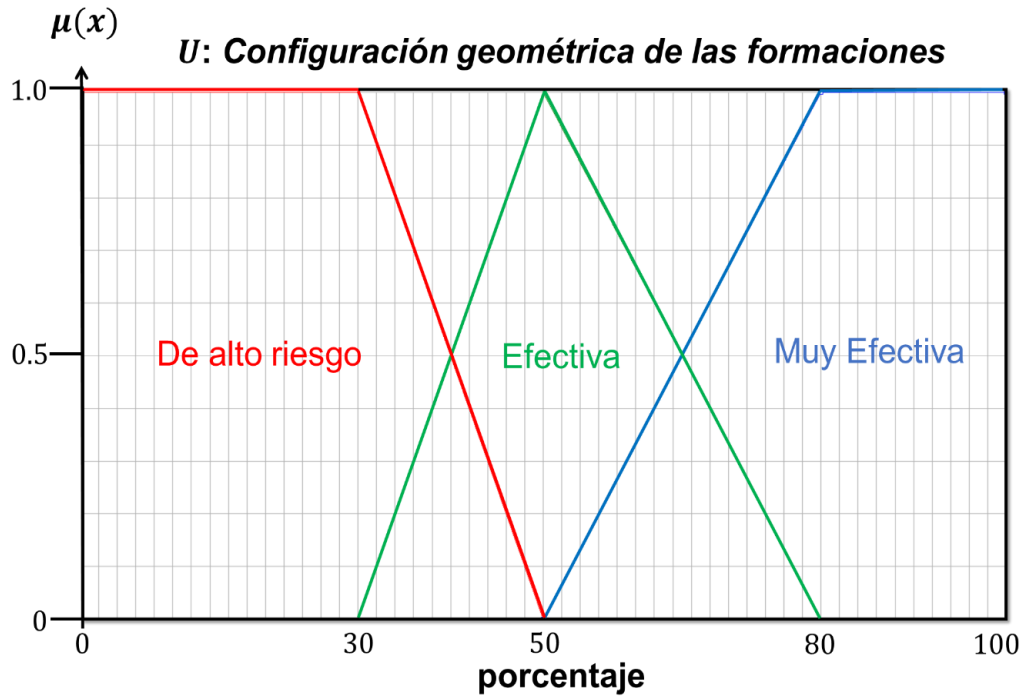


Figura III. 40. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Configuración geométrica de las formaciones*.

Resumiendo, este sub sistema se estructura en 2 variables de entrada (*Efectividad de la formación sello* y *Continuidad lateral de las formaciones*), una variable de salida (*Configuración geométrica de las formaciones*) y un bloque de reglas compuesto por 27 reglas posibles, de las cuales 18 tienen un DoS de 0 y 9 un DoS de 1. En la **Tabla III. 6** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si- Entonces.

Tabla III. 6. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Configuración geométrica de las formaciones*.

Número de Regla		Cobertura a techo	Y	Cobertura a muro	ENTONCES	Configuración geométrica de la formación	DoS
1	SI	Insuficiente	Y	Insuficiente	ENTONCES	De alto riesgo	1.0
27	SI	Suficiente	Y	Suficiente	ENTONCES	Muy Efectiva	1.0
4	SI	Insuficiente	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	De alto riesgo	1.0
23	SI	Suficiente	Y	Apenas Suficiente	ENTONCES	Efectiva	1.0
14	SI	Apenas Suficiente	Y	Suficiente	ENTONCES	Efectiva	1.0
3	SI	Insuficiente	Y	Insuficiente	ENTONCES	Muy Efectiva	0.0
25	SI	Suficiente	Y	Suficiente	ENTONCES	De alto riesgo	0.0

III.4.4 Salida: Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello

Finalmente las salidas (defuzzificadas) de los sub sistemas: *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica de las formaciones*, sirven como variables de entrada que califican a la *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello* a configurar un almacén geológico de CO₂, la salida (defuzzificada) funge como cuarta variable del sistema difuso global.

Los conjuntos difusos para esta variable lingüística de salida son No aptas, Moderadamente aptas y Aptas. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típico) para el conjunto no aptas están en 25 por ciento o menos, moderadamente aptas en 50 por ciento y para aptas en 75 por ciento o más (**Figura III. 41**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos

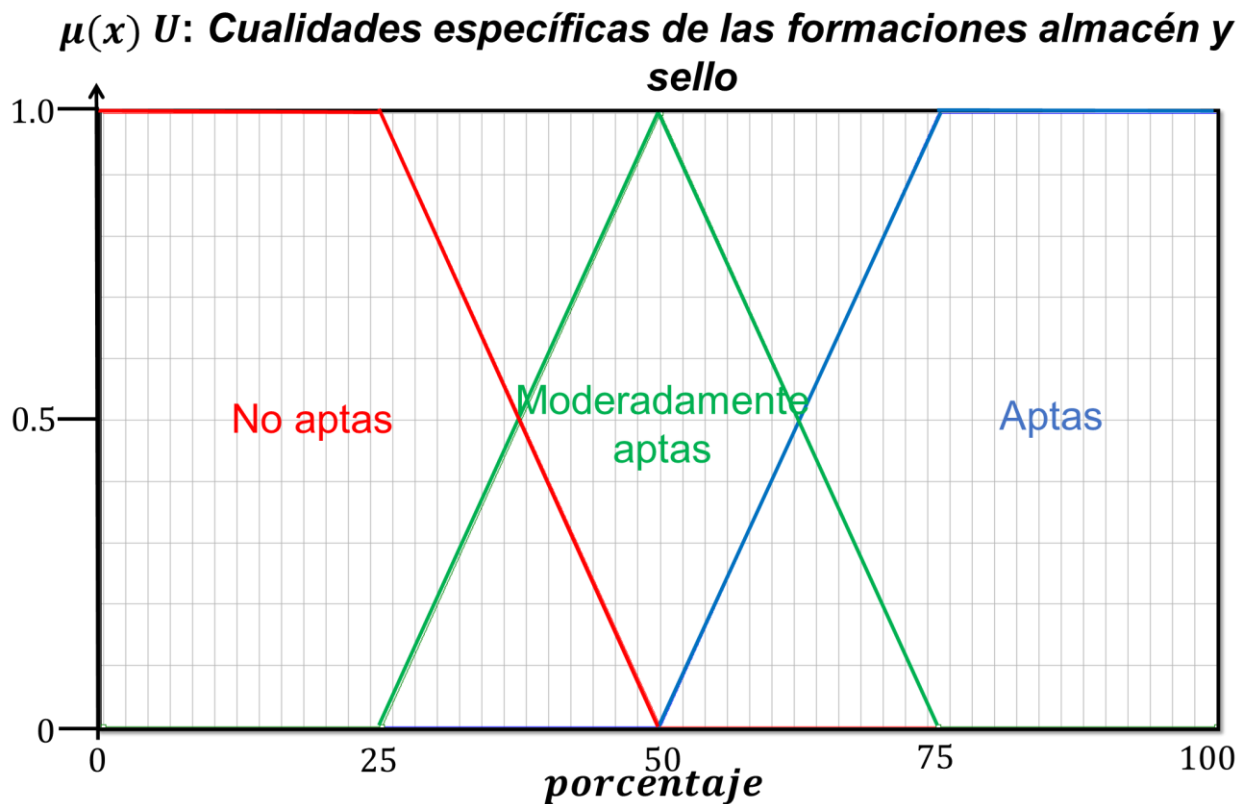


Figura III. 41. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

Resumiendo este sub sistema difuso se configura por 3 variables de entrada (obtenidas como salidas de cada sub sistema difuso): *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica de las formaciones*, una variable de salida: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*) y un bloque de reglas compuesto por 81 reglas posibles, de las cuales 51 tienen un DoS de 0 y 30 un DoS de 1. En la **Tabla III. 7** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si- Entonces-

Tabla III. 7. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Cualidad específica de las formaciones almacén y sello*

Regla		<i>Calidad f. almacén</i>	Y	<i>Calidad f. sello</i>	Y	<i>Configuración geométrica</i>	ENTONCES	<i>Cualidades esp de las formaciones</i>	DoS
1	SI	Mala	Y	Mala	Y	De alto riesgo	ENTONCES	No aptas	1.0
81	SI	Muy Buena	Y	Muy Buena	Y	Muy Efectiva	ENTONCES	Aptas	1.0
41	SI	Buena	Y	Buena	Y	Efectiva	ENTONCES	Moderadamente aptas	1.0
46	SI	Buena	Y	Muy Buena	Y	De alto riesgo	ENTONCES	No aptas	1.0
61	SI	Muy Buena	Y	Mala	Y	Muy Efectiva	ENTONCES	No aptas	1.0
50	SI	Buena	Y	Muy Buena	Y	Efectiva	ENTONCES	Moderadamente aptas	1.0
3	SI	Mala	Y	Mala	Y	De alto riesgo	ENTONCES	Aptas	0.0
79	SI	Muy Buena	Y	Muy Buena	Y	Muy Efectiva	ENTONCES	No aptas	0.0
56	SI	Muy Buena	Y	Mala	Y	De alto riesgo	ENTONCES	Moderadamente aptas	0.0
62	SI	Muy Buena	Y	Mala	Y	Muy Efectiva	ENTONCES	Moderadamente aptas	0.0

Para ilustrar el proceso lógico difuso que califica a la variable *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello* se propone el siguiente ejercicio:

En la cuenca sedimentaria X se ha estudiado a partir de núcleos y de correlaciones litoestratigráficas las propiedades siguientes:

Sub sistema 1: Calidad de la formación almacén.	
Porosidad representativa del almacén	20%
Permeabilidad representativa de la formación almacén	120 mD
Homogeneidad de la formación almacén	60%
Sub sistema 2: Calidad de la formación sello	
Porosidad representativa del sello	6%
Permeabilidad representativa de la formación sello	0.65 mD
Homogeneidad de la formación sello	65%
Sub sistema 3: Configuración geométrica de las formaciones	
Cobertura a techo	1.25
Cobertura a muro	0.875

A continuación se mostrara el proceso lógico difuso por sub sistema.

Sub sistema 1:Calidad de la formación almacén

Para el primer sub sistema, se debe como primer instancia realizar la fuzzificación de los valores de entrada (**Figura III. 42, Figura III. 43 y Figura III. 44**)

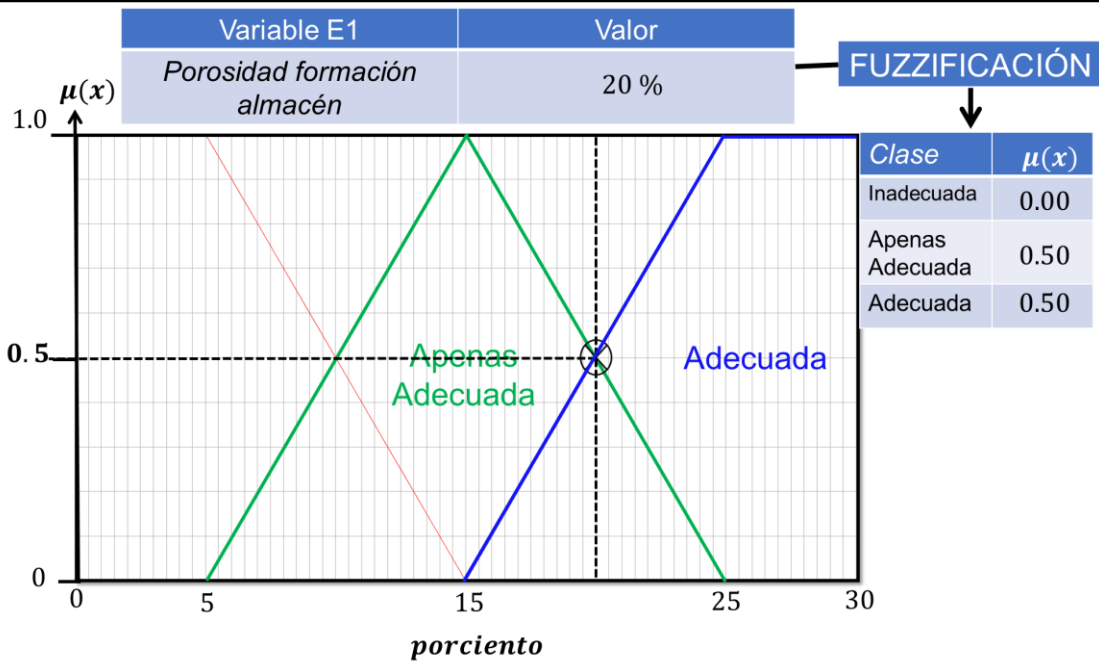


Figura III. 42. Fuzzificación de la variable *Porosidad* representativa de la formación almacén (20 porciento).

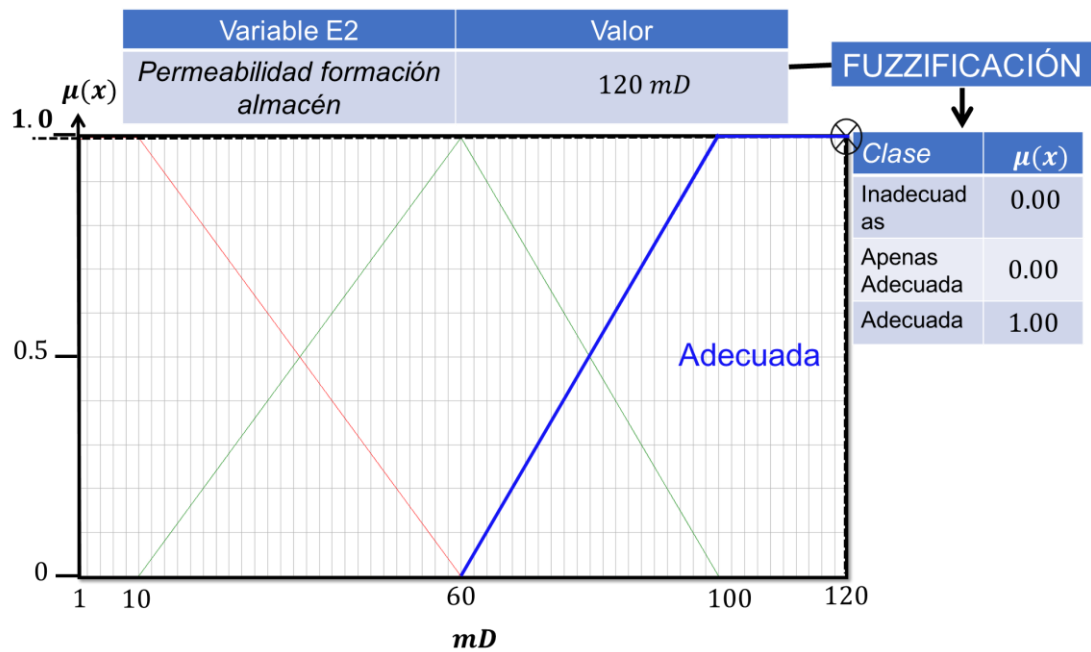


Figura III. 43. Fuzzificación de la variable *Permeabilidad* representativa de la formación almacén (120 mD).

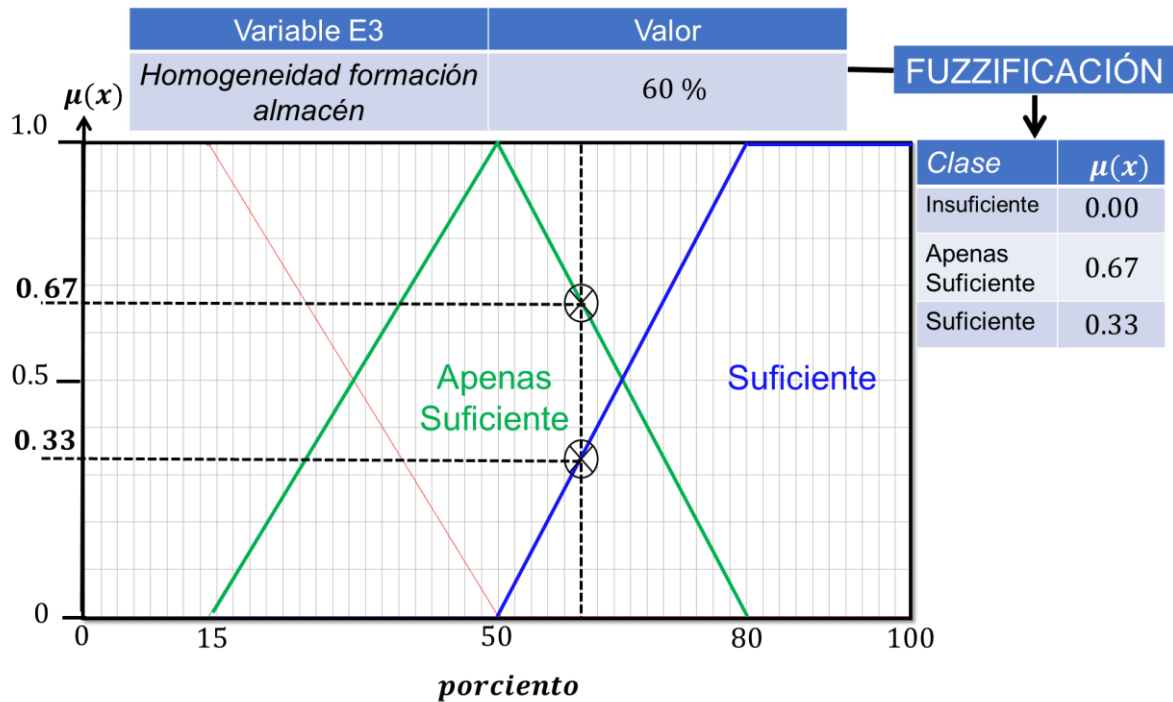


Figura III. 44. Fuzzificación de la variable *Homogeneidad de la formación almacén* (60 por ciento).

Paso seguido será necesario evaluar las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas, con el objetivo de obtener el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla, para este sistema se considera el operador AND de Zadeh para realizar la evaluación de las reglas. Se muestran un ejemplo de este proceso: la regla 77 (**Figura III. 45**). Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto.

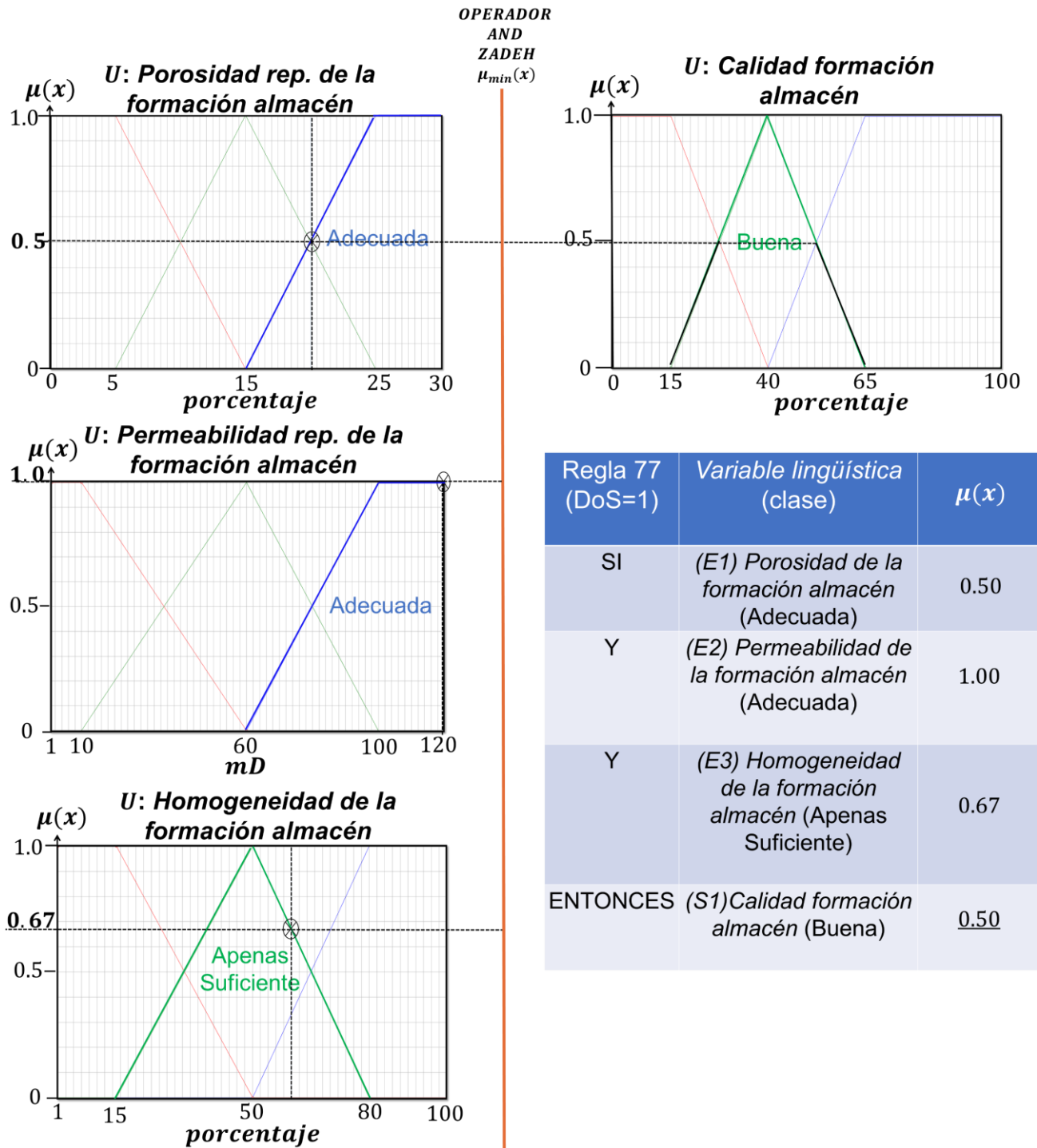


Figura III. 45. Proceso de análisis de la regla 77 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Una vez realizada la evaluación de reglas y obtenidos los DoV será necesario realizar el proceso de agregación que permitirá obtener la salida difusa (**Figura III. 46**). Es importante mencionar que la regla mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Muy Buena de la variable lingüística *Calidad de la formación almacén*.

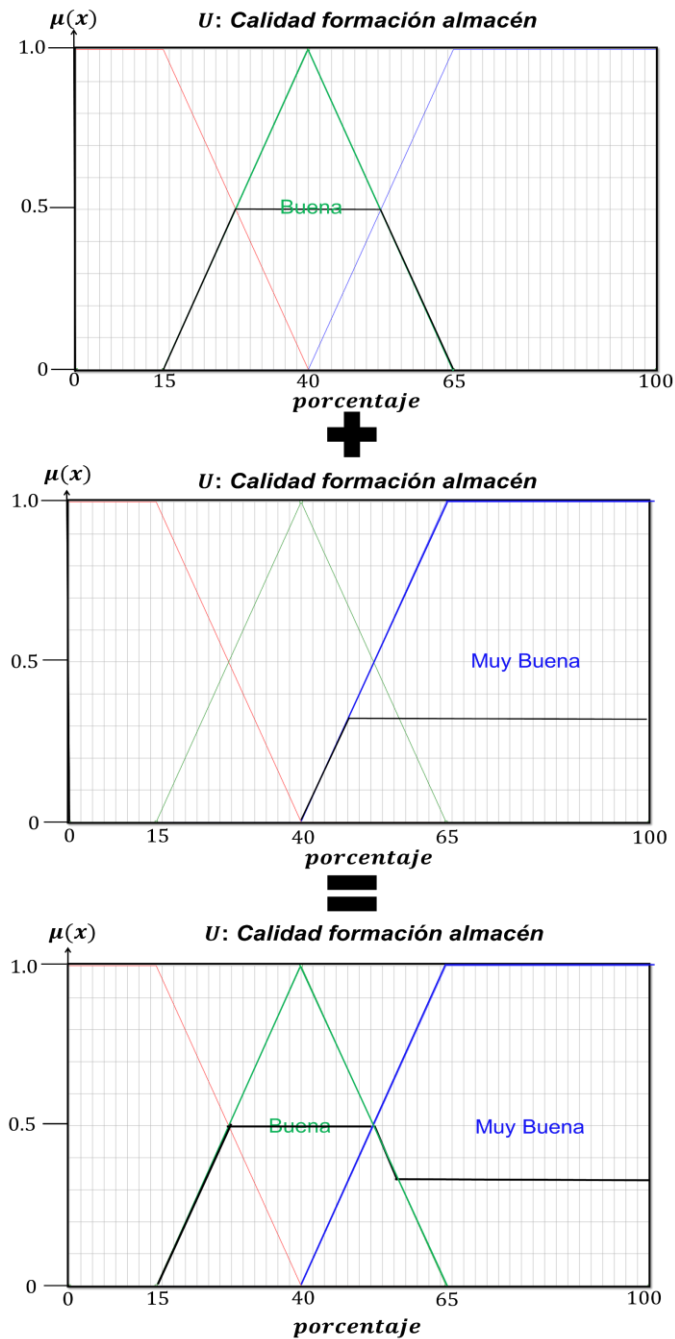


Figura III. 46. Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 47**). Para el ejemplo se concluye que la *Calidad de la formación almacén* pertenece:

0.50 al conjunto Buena

0.33 al conjunto Muy Buena

Con un valor de 60% en la base de la variable *Calidad de la formación almacén*.

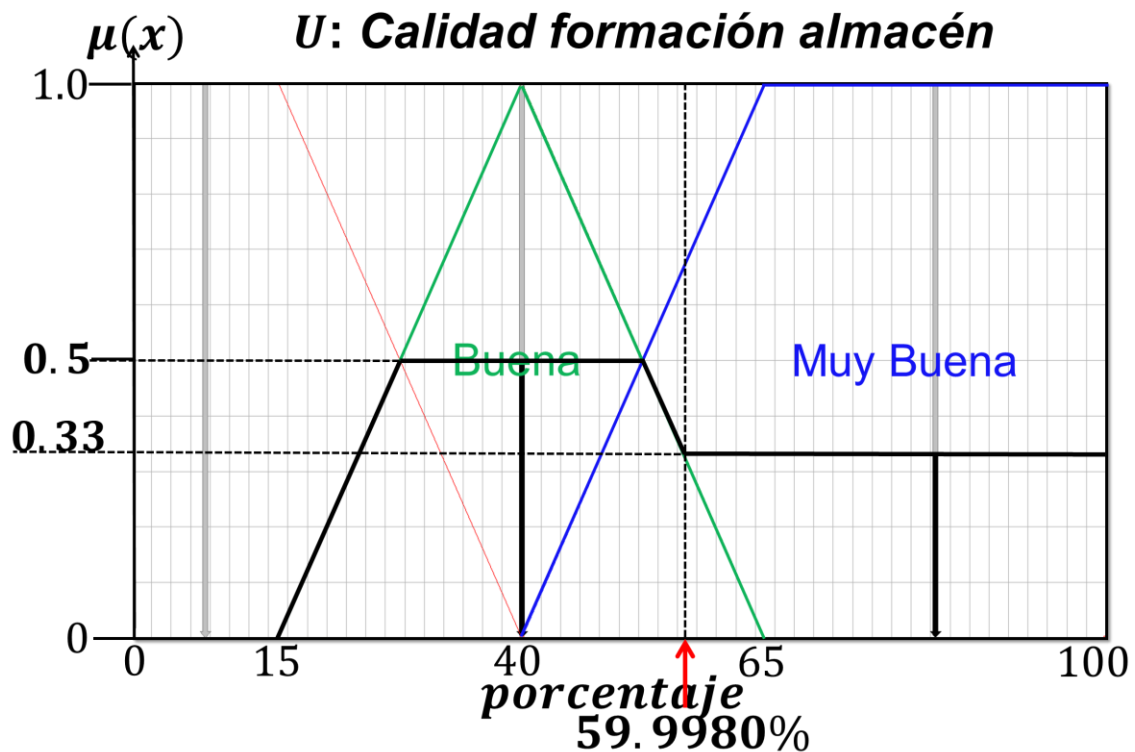


Figura III. 47. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.

Sub sistema 2: Calidad de la formación sello.

Para el segundo sub sistema, se debe como primer instancia realizar la fuzzificación de los valores de entrada (**Figura III. 48**, **Figura III. 49** y **Figura III. 50**).

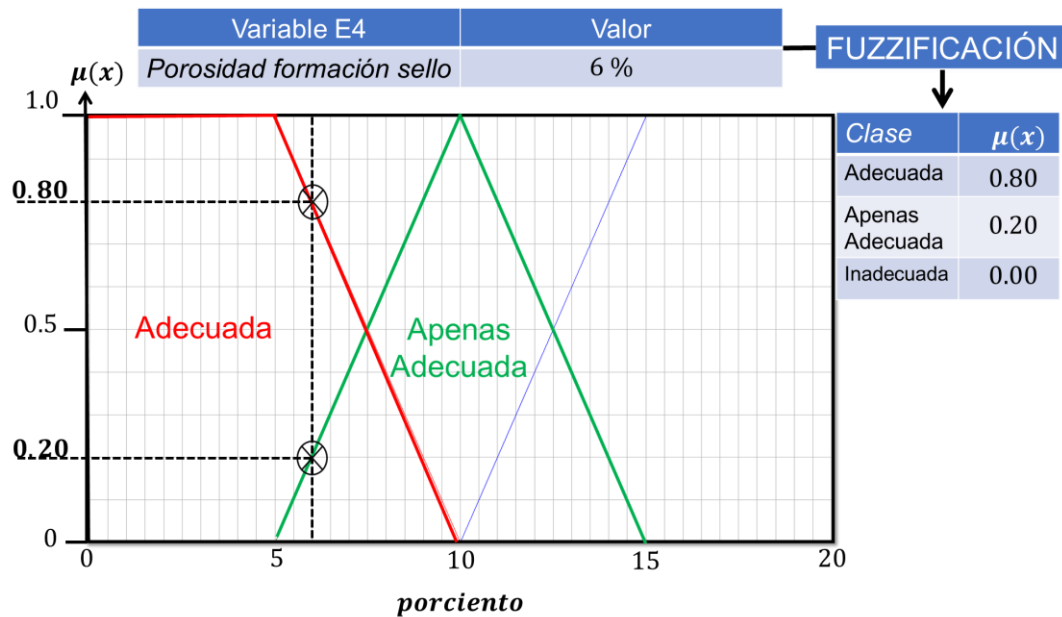


Figura III. 48. Fuzzificación de la variable *Porosidad* representativa de la formación sello (6 porciento).

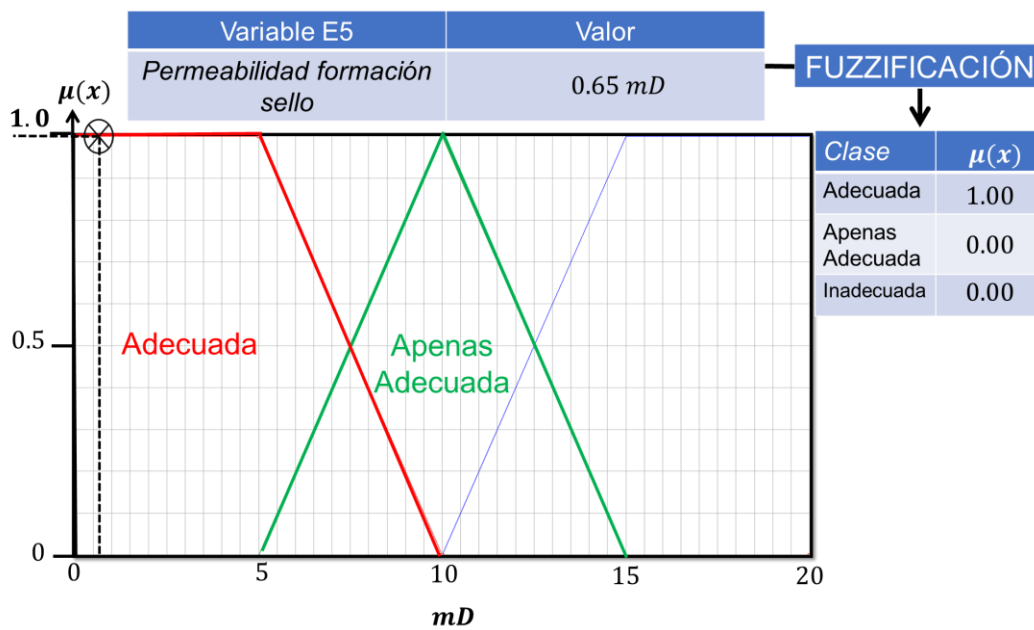


Figura III. 49. Fuzzificación de la variable *Permeabilidad* representativa de la formación sello (0.65 mD).

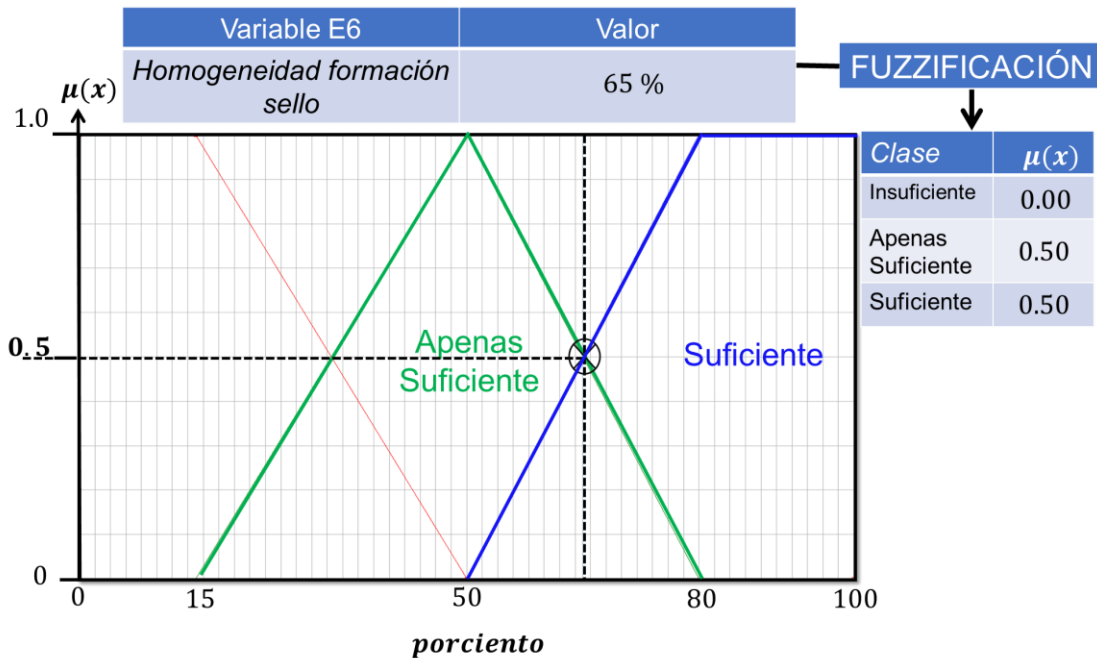


Figura III. 50. Fuzzificación de la variable *Homogeneidad de la formación sello* (65 por ciento).

Paso seguido será necesario evaluar las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas, con el objetivo de obtener el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla, para este sistema se considera el operador AND de Zadeh para realizar la evaluación de las reglas. Se muestran un ejemplo de este proceso: la regla 9 (**Figura III. 51**).

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto .

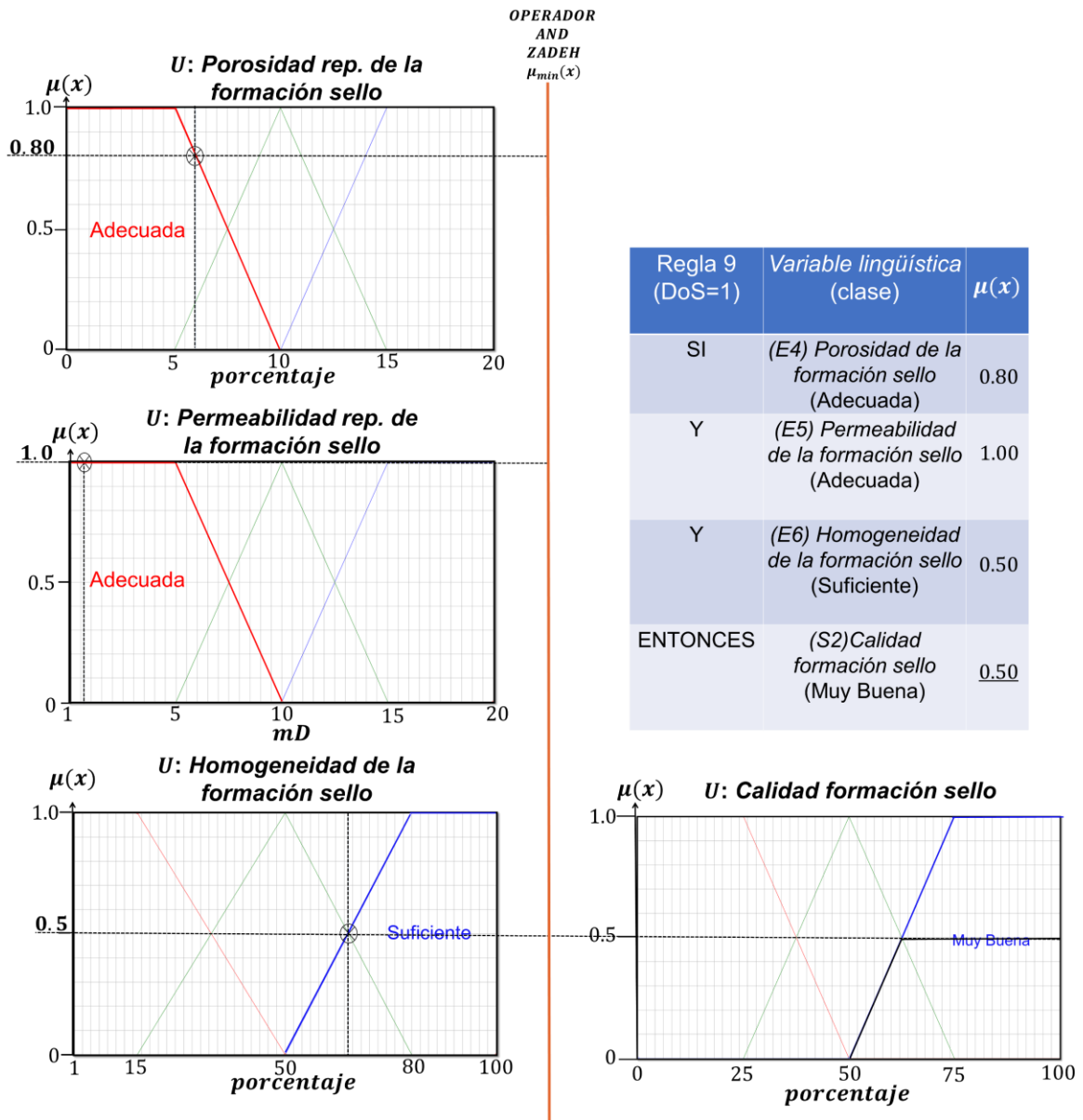


Figura III. 51. Proceso de análisis de la regla 9 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Una vez realizada la evaluación de reglas y obtenidos los DoV será necesario realizar el proceso de agregación que permitirá obtener la salida difusa **Figura III. 52**). Es importante mencionar que la regla mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Muy Buena de la variable lingüística *Calidad de la formación sello*.

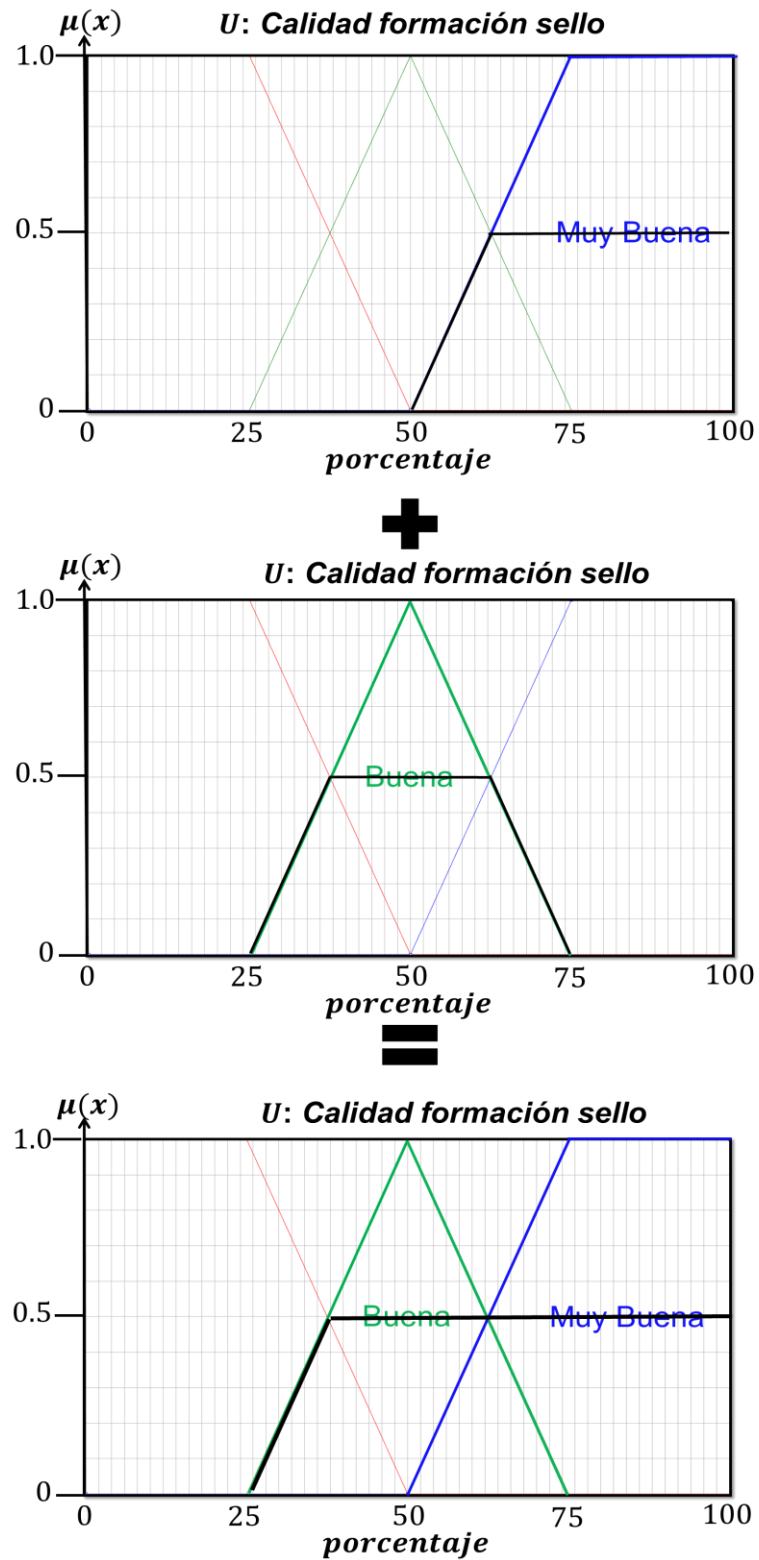


Figura III. 52. Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 53**). Para el ejemplo se concluye que la *Calidad de la formación sello* pertenece:

0.24 al conjunto Buena

0.66 al conjunto Muy Buena

Con un valor de 68.75% en la base de la variable *Calidad de la formación sello*.

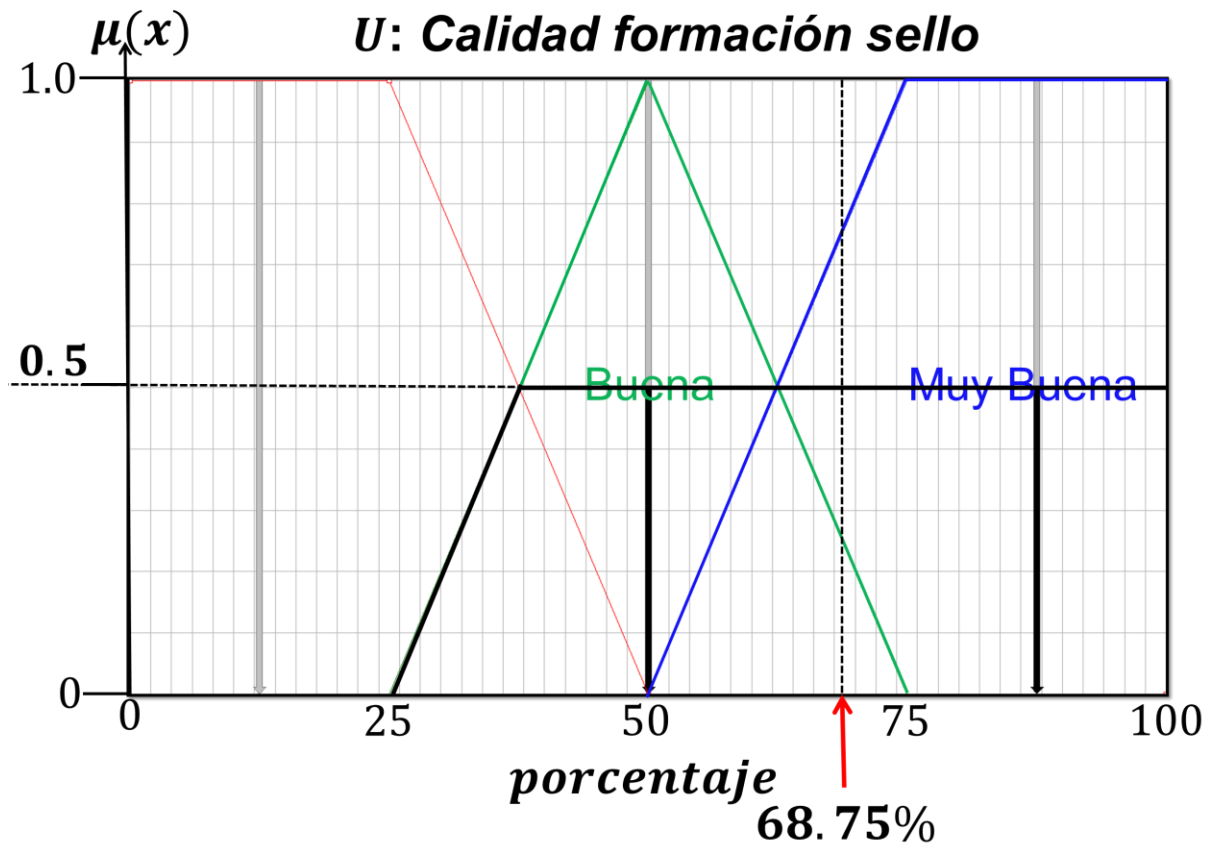


Figura III. 53. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.

Sub sistema 3: Configuración geométrica de las formaciones.

Para el tercer sub sistema, se debe como primer instancia realizar la fuzzificación de los valores de entrada (**Figura III. 54** y **Figura III. 55**).

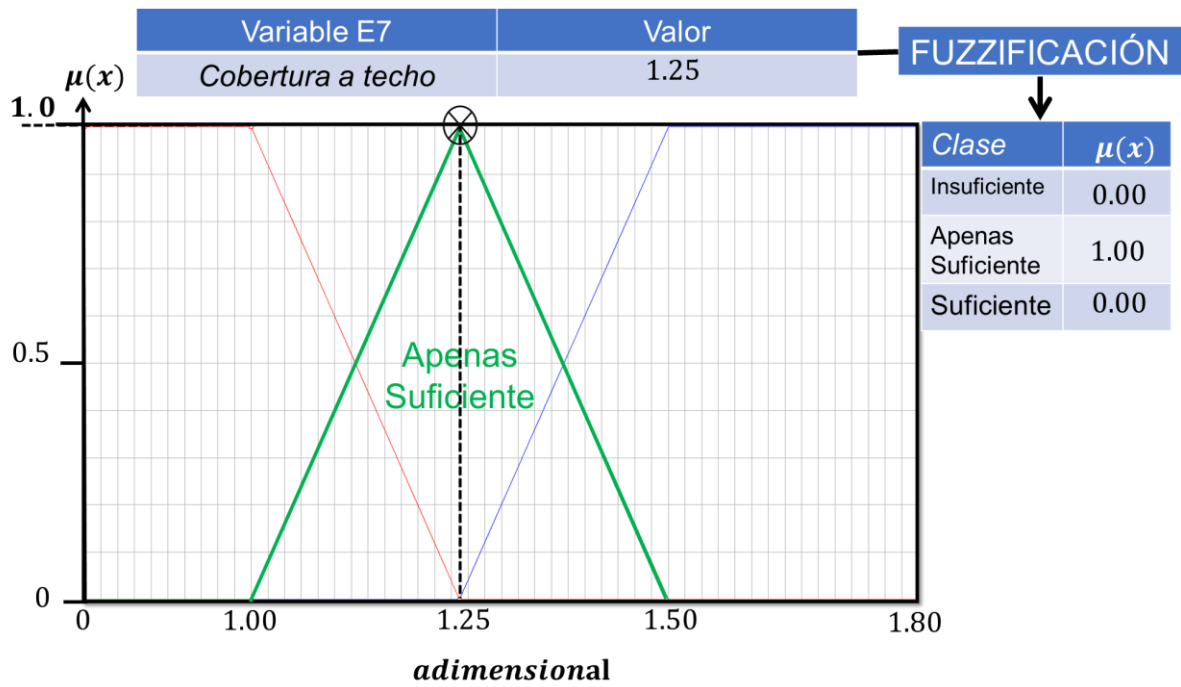


Figura III. 54. Fuzzificación de la variable *Cobertura a techo* (1.25).

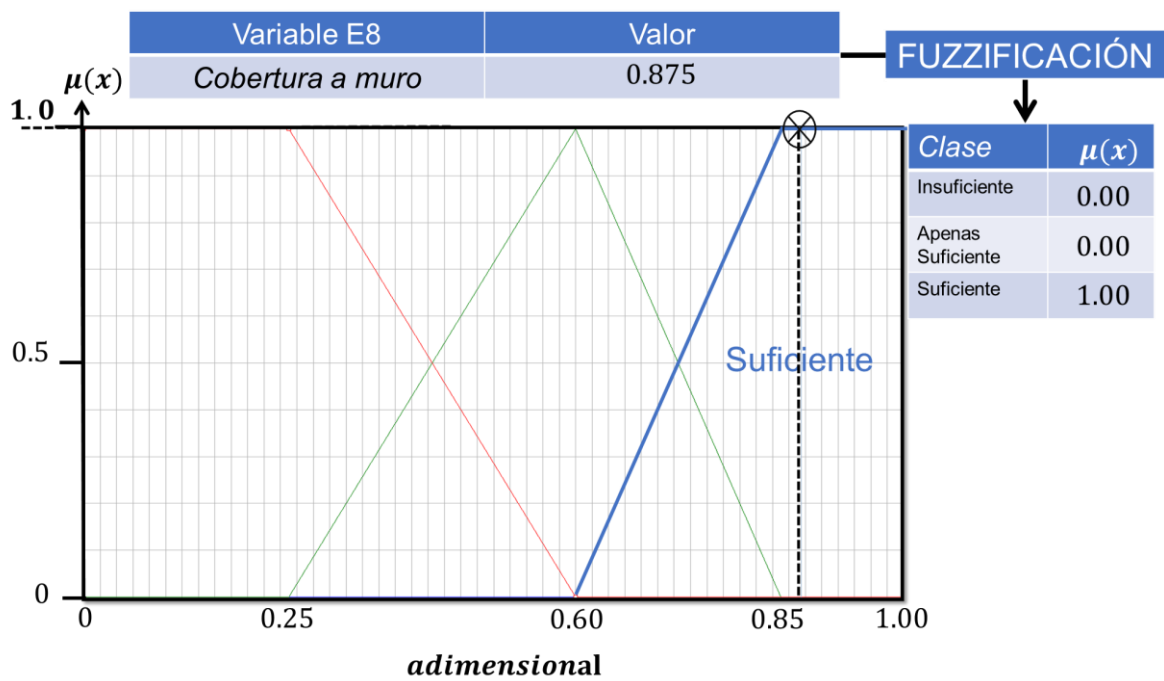


Figura III. 55. Fuzzificación de la variable *Cobertura a muro* (0.875).

Paso seguido será necesario evaluar las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas, con el objetivo de obtener el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla, para este sistema se considera el operador AND de Zadeh para realizar la evaluación de las reglas. Se muestran un ejemplo de este proceso: la regla 18 (**Figura III. 56**).

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto .

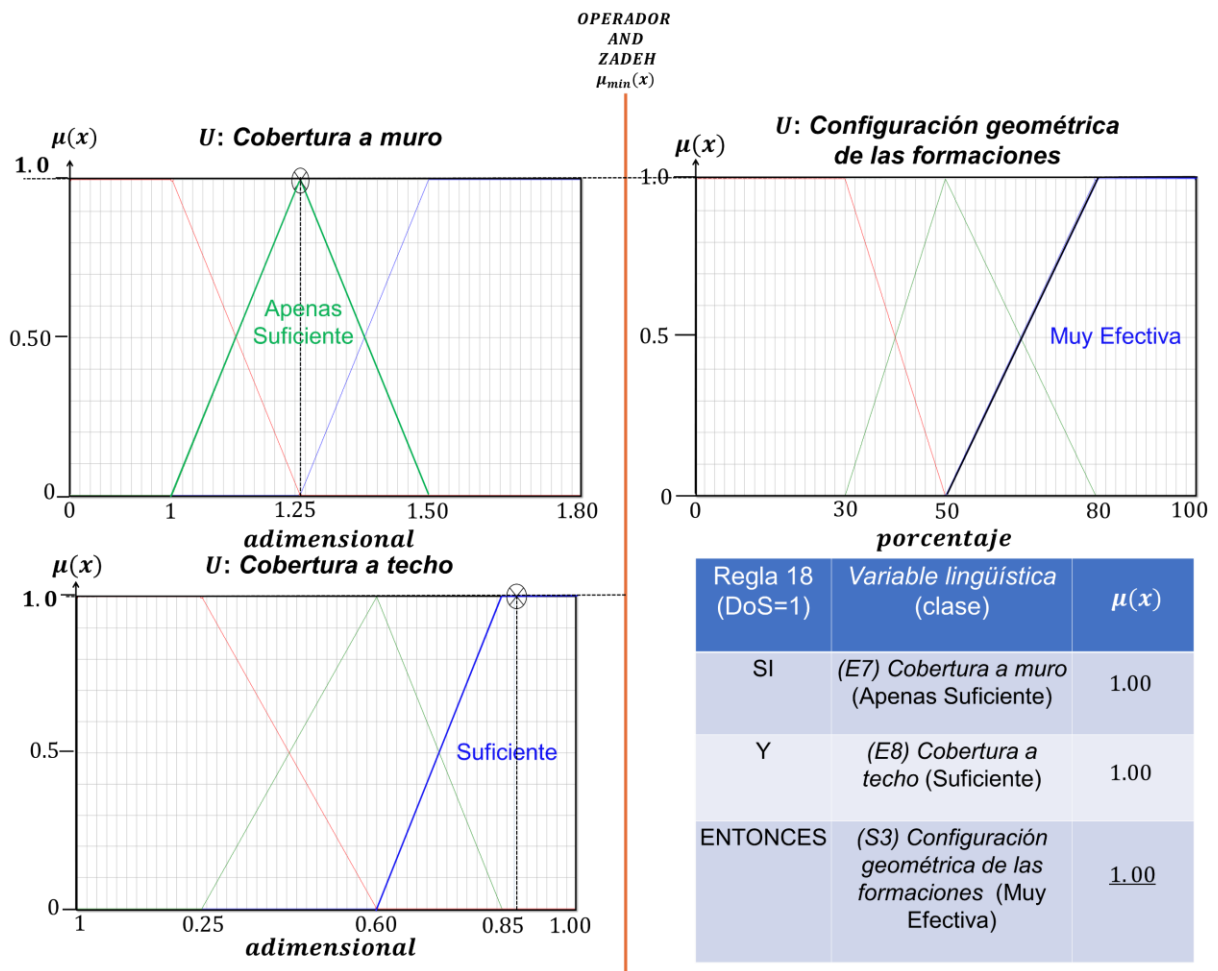


Figura III. 56. Proceso de análisis de la regla 18 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Una vez realizada la evaluación de reglas y obtenidos los DoV será necesario realizar el proceso de agregación que permitirá obtener la salida difusa. Es importante mencionar que la regla mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Adecuada (único conjunto activado) de la variable lingüística *Configuración geométrica de las formaciones*.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 57**). Para el ejemplo se concluye que la *Calidad de la formación sello* pertenece:

1.00 al conjunto Efectiva

Con un valor de 90% en la base de la variable *Configuración geométrica de las formaciones*.

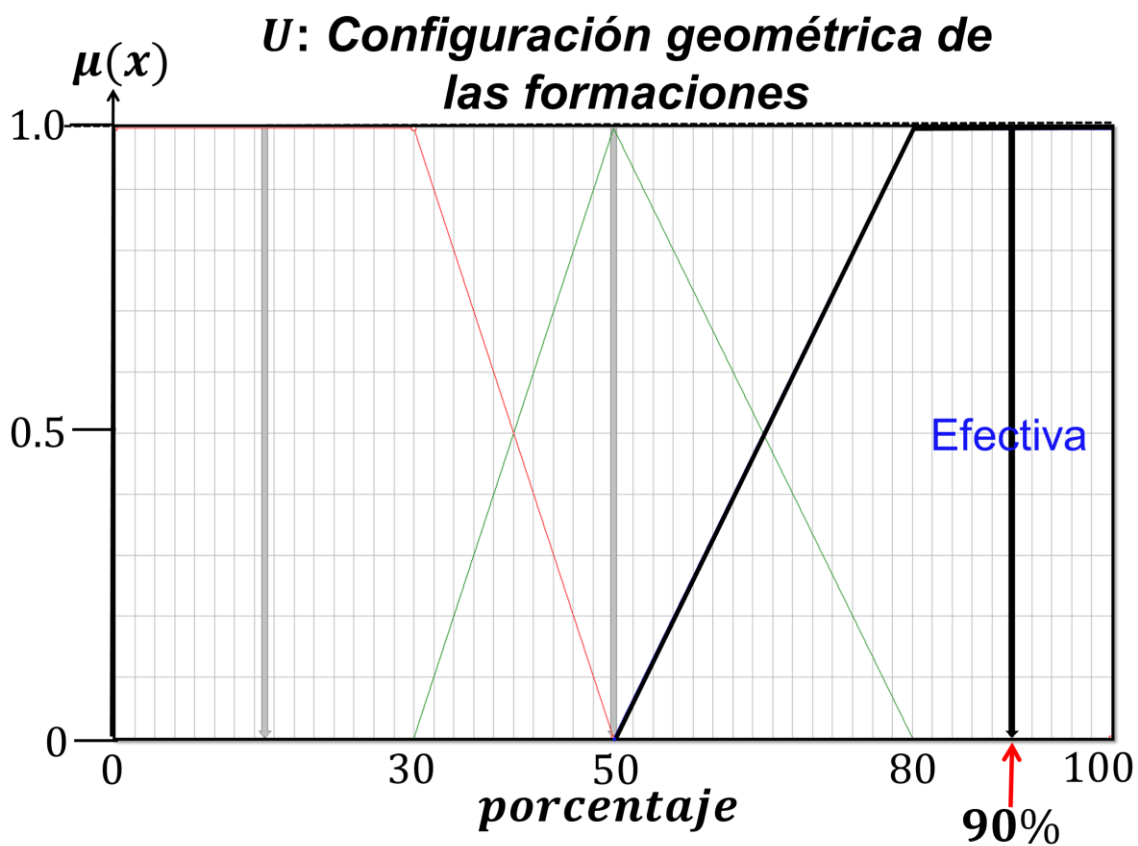


Figura III. 57. Defuzzificación mediante el método de centroide.

Sub sistema 4: Calidad de las formaciones.

Una vez analizadas y obtenidas las tres variables de salida: *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica de las formaciones*, estas adoptarán el papel de variables de entrada que calificarán a la cuarta variable del sistema difuso global: *Calidad de las formaciones* a fungir como un almacén geológico de CO₂. El proceso es el mismo al de los subsistemas previos, del análisis de la agregación se permite obtener la salida difusa (**Figura III. 58**).

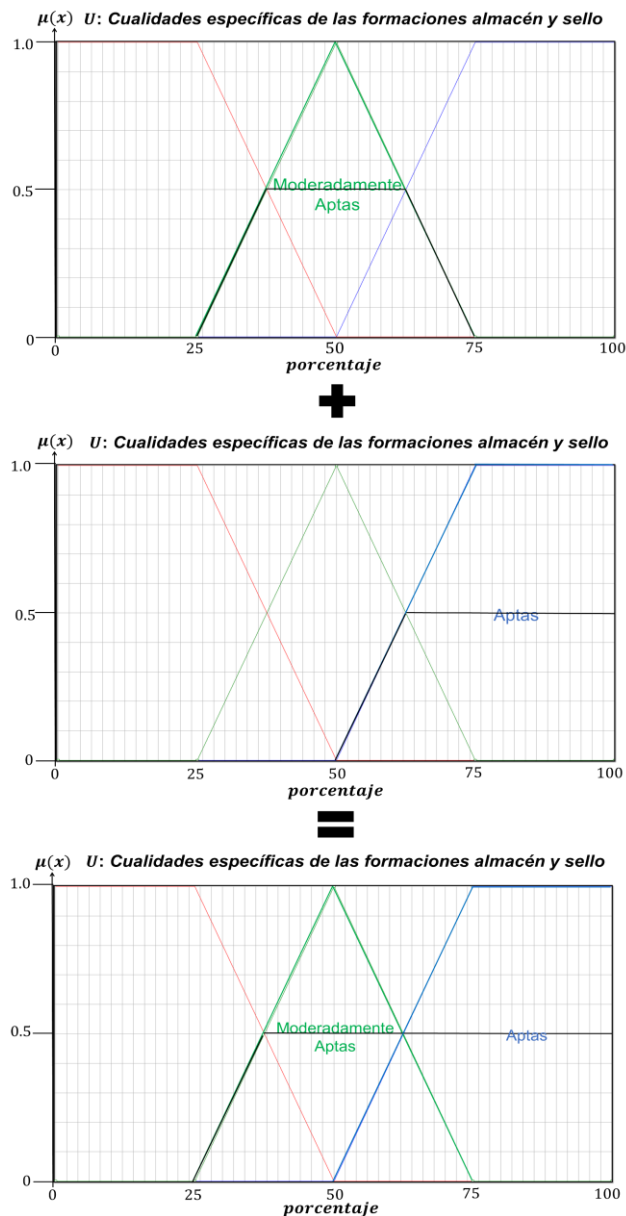


Figura III. 58. Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 59**). Para el ejemplo se concluye que la *Cualidad de las formaciones* pertenece:

0.27 al conjunto Moderadamente aptas

0.63 al conjunto Aptas

Con un valor de 68.75% en la base de la variable *Cualidad de las formaciones*.

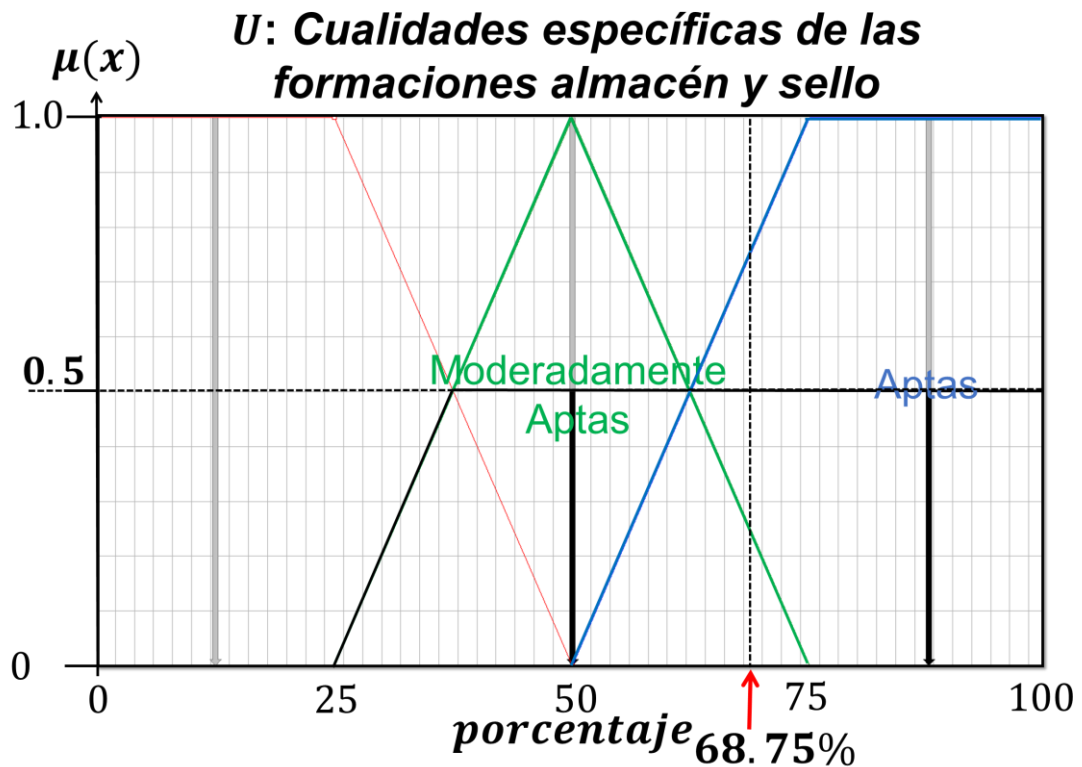


Figura III. 59. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.

III.5 Cualidades geotérmicas y de presión (Calidad de la fase)

La quinta variable tiene por objetivo calificar las condiciones de temperatura (gradiente geotérmico) y presión (gradiente de presión) -relativas a la profundidad-de acuerdo con los requerimientos para que el Dióxido de Carbono se inyecte, almacene y comporte, en el medio geológico, en fase supercrítica (fluido en densidad de líquido y viscosidad de gas con la que se garantiza almacenar la mayor cantidad de CO₂ en el espacio poroso disponible). Las circunstancias teóricas que deben presentarse para conseguir dicha fase son 31.1 ° C, y 7.38 MPa a profundidad de al menos 800 metros (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006; Underschultz et al, 2016).

El gradiente geotérmico dentro de una cuenca sedimentaria está determinado por la magnitud e interacción de las distintas fuentes de calor y los mecanismos de transferencia por los que el calor terrestre se transfiere a la superficie. Mientras que la *presión* en un punto de la geosfera es función de la presión litostática (columna de sedimentos que soporta) y la hidrostática (columna de agua por encima del punto). La presión en los poros de las rocas sedimentarias depende del fluido que los llena y la forma en la que están conectados (Bachu, 2003; CIEMAT, 2006). Ya que la *profundidad* es una variable intrínsecamente relacionada con la *temperatura* y la *presión* se han establecido gradientes promedios de temperatura (25°C / km) y presión (10MPa / km) de la Tierra (**Figura III. 60**) (Bachu, 2000).

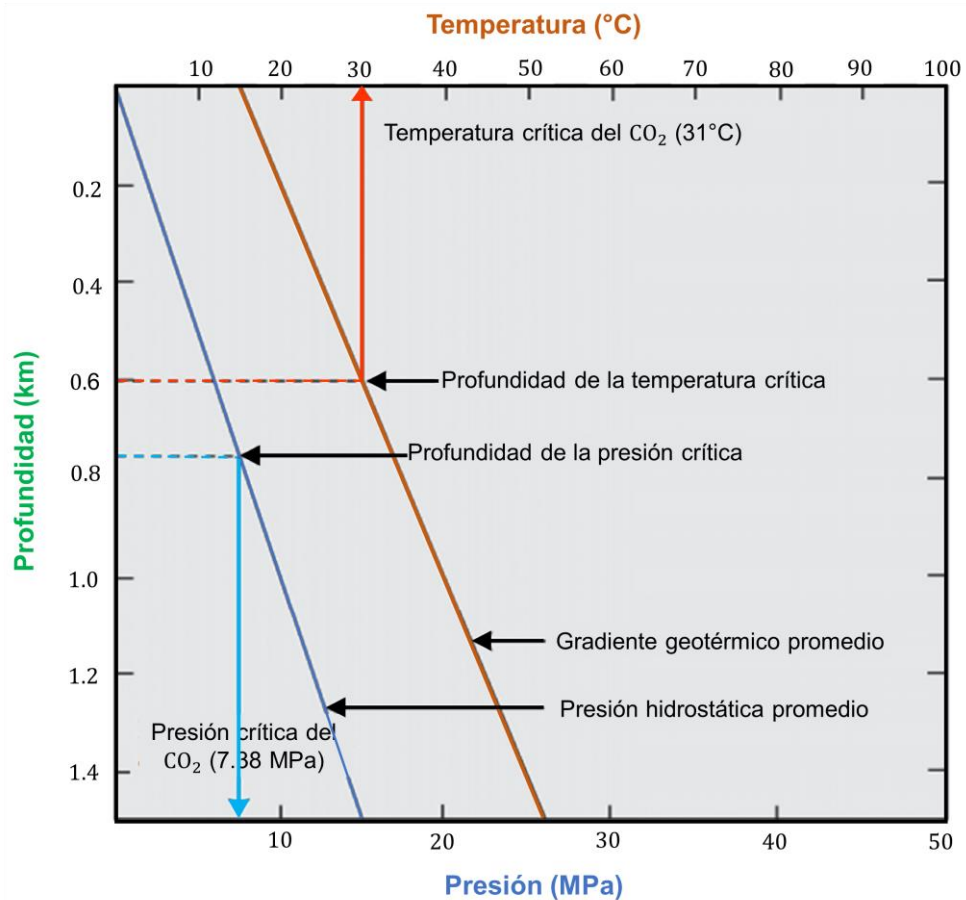


Figura III. 60. Gradientes de presión y temperatura, profundidades estimadas para alcanzar el estado supercrítico (modificado de CIEMAT, 2006).

Dada su complejidad, esta variable se configura en un sub sistema difuso compuesto por tres variables de entrada:

- Profundidad (estimación a techo de la formación almacén)
- Temperatura (obtenida a partir del gradiente geotérmico).
- Presión (obtenida a partir del gradiente de presión).

La categoría salida (*defuzzificada*) se convierte en la quinta entrada del sistema difuso global.

III.5.1 Profundidad

Los conjuntos difusos de la variable lingüística *Profundidad* son Insuficiente, Apenas Suficiente, Suficiente. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto insuficiente está en 0.6 kilómetros o menos, para apenas suficiente en 0.8 kilómetros y para suficiente 1 kilómetro o más (**Figura III. 61**). Para una *Profundidad* superior a 1.2 o inferior a 0.4 kilómetros basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

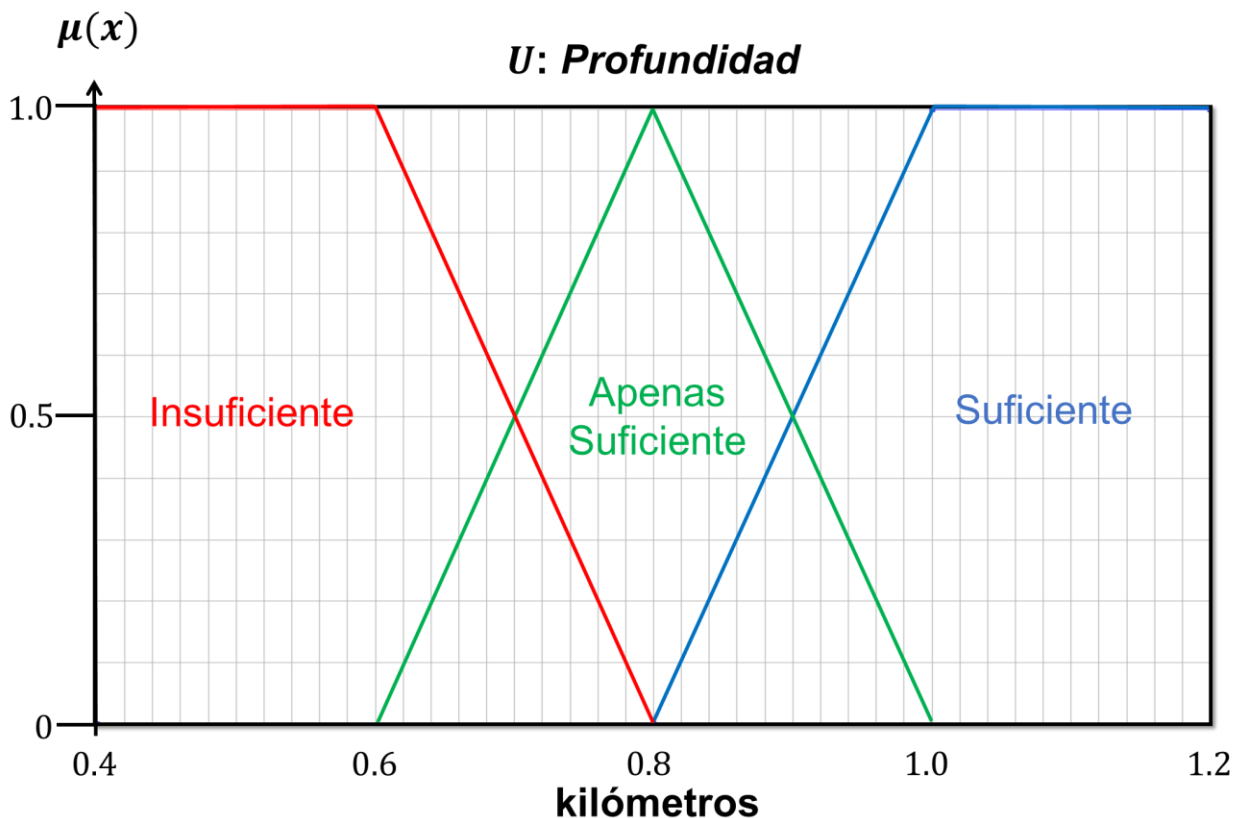


Figura III. 61. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Profundidad*.

III.5.2 Temperatura

Para la variable lingüística *Temperatura* los conjuntos difusos son: Inadecuada, Apenas Adecuada, Adecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto inadecuada está en

31.1 °C o menos, para apenas adecuada en 34 °C y para adecuada esta en 36.9 °C o más (**Figura III. 62**). Para una *Temperatura* superior a 40 o inferior a 28 °C basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda.

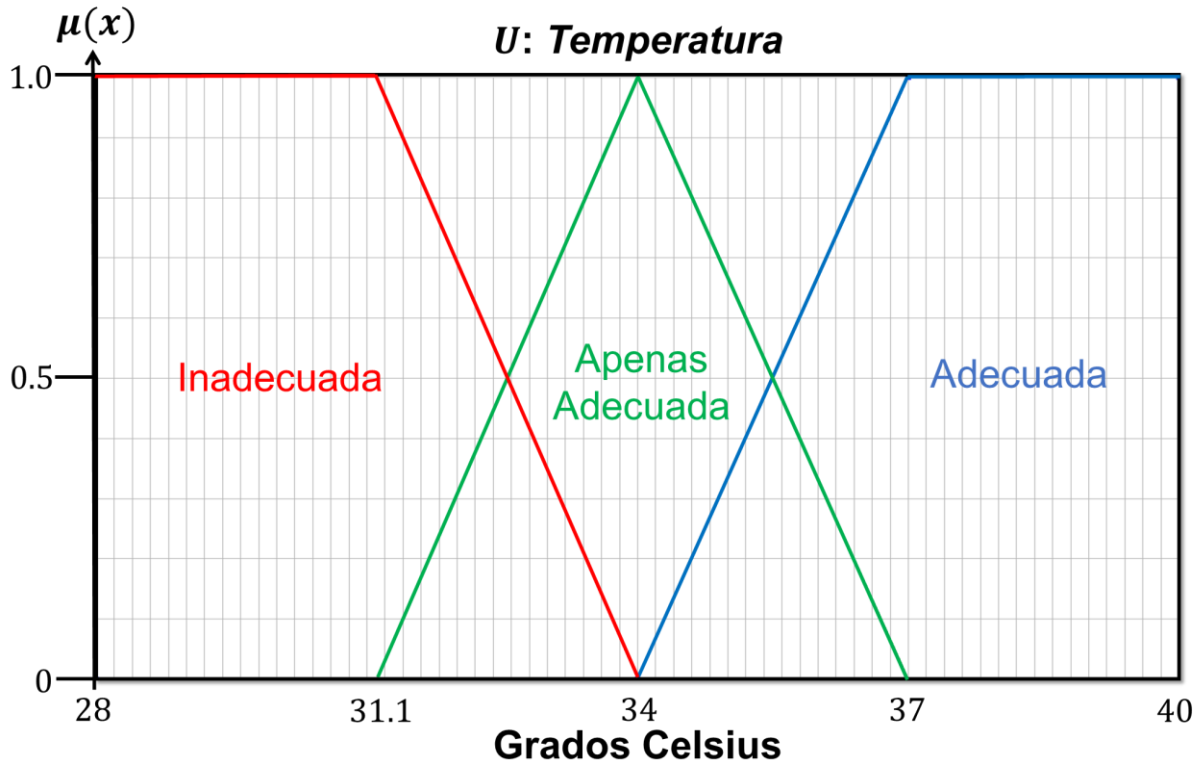


Figura III. 62. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Temperatura*.

III.5.3 Presión

Para la tercer variable lingüística de entrada *Presión*, los conjuntos difusos son: Inadecuada, Apenas Adecuada, Adecuada. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto insuficiente está en 7.38 MPa o menos, para apenas suficiente en 8 MPa y para suficiente 9 MPa o más (**Figura III. 63**).

Para una *Presión* superior a 10 o inferior a 6.5 (sin ser 0 absoluto) MPa basta con asignar el valor típico máximo o mínimo según corresponda

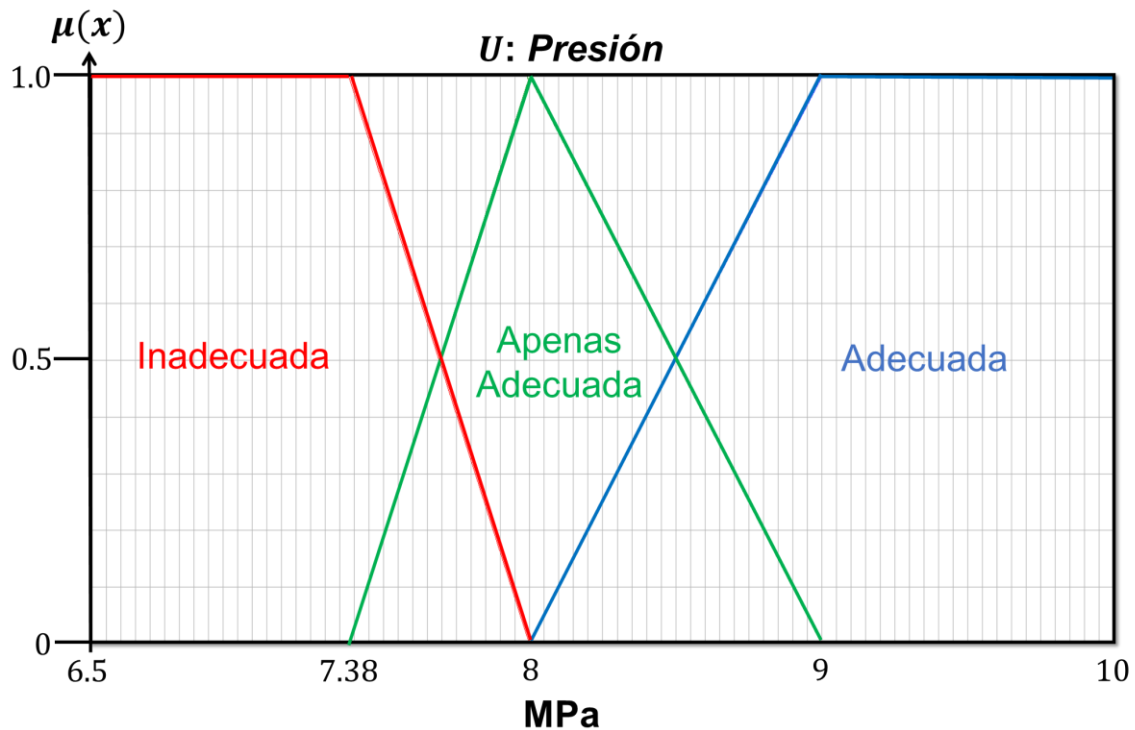


Figura III. 63. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Presión*.

III.5.4 Salida: Cualidades geotérmicas y de presión

Las tres variables de entrada (*Profundidad*, *Temperatura* y *Presión*) permiten definir las *Cualidades geotérmicas y de presión*. Los conjuntos difusos de la variable lingüística *Cualidades geotérmicas y de presión* son No aptas, Apenas Aptas y Aptas. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto no aptas están en 1 o menos, para notable en 1.25 y para extrema en 1.5 o o más (**Figura III. 64**).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos.

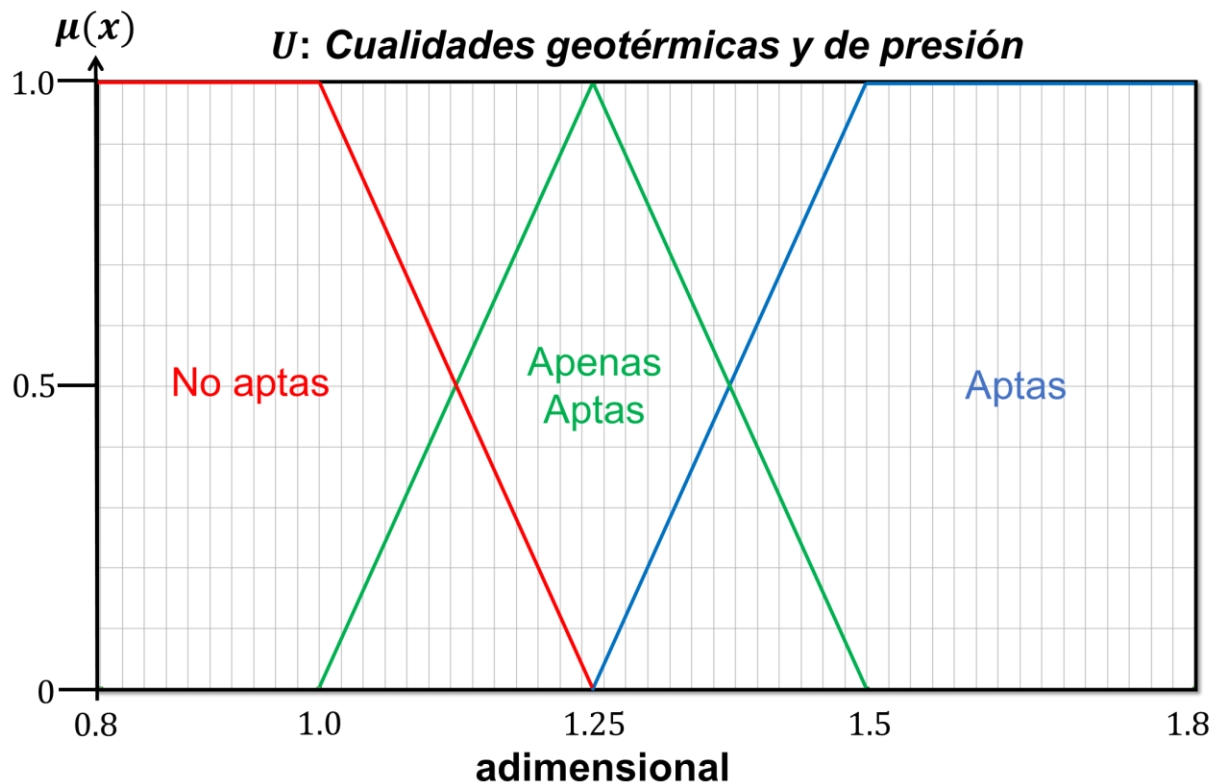


Figura III. 64. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Cualidades geotérmicas y de presión*.

El bloque de reglas del subsistema con 3 variables de entrada (*Profundidad*, *Temperatura* y *Presión*) y una variable de salida (*Cualidades geotérmicas y de presión*) está compuesto por 81 reglas posibles, con 24 reglas de DoS igual a 1 y 57 con un grado de soporte igual a 0. En la **Tabla III. 8** se muestran algunos ejemplos de las reglas Si-Entonces.

Tabla III. 8. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Cualidades geotérmicas y de presión*.

Regla		Profundidad		Temperatura		Presión		Cualidades geotérmicas y de presión	DoS
1	SI	Insuficiente	Y	Inadecuada	Y	Inadecuada	ENTONCES	No Aptas	1.00
81	SI	Suficiente	Y	Adecuada	Y	Adecuada	ENTONCES	Aptas	1.00
41	SI	Apenas Suficiente	Y	Apenas Adecuada	Y	Apenas Adecuada	ENTONCES	Apenas Aptas	1.00
72	SI	Suficiente	Y	Apenas Adecuada	Y	Adecuada	ENTONCES	Aptas	1.00
31	SI	Apenas Suficiente	Y	Inadecuada	Y	Apenas Adecuada	ENTONCES	No Aptas	1.00
54	SI	Apenas Suficiente	Y	Adecuada	Y	Adecuada	ENTONCES	Aptas	1.00
79	SI	Suficiente	Y	Adecuada	Y	Adecuada	ENTONCES	No Aptas	0.00
3	SI	Insuficiente	Y	Inadecuada	Y	Inadecuada	ENTONCES	Aptas	0.00
66	SI	Suficiente	Y	Apenas Adecuada	Y	Inadecuada	ENTONCES	Aptas	0.00
61	SI	Suficiente	Y	Inadecuada	Y	Adecuada	ENTONCES	Apenas Aptas	0.00

Para aclarar el funcionamiento de este sub sistema se propone el siguiente ejercicio. Suponga que en la cuenca sedimentaria X tiene las siguientes características:

- *Profundidad:* 0.9 kilómetros
- *Temperatura:* 36 °C
- *Presión:* 8.2 MPa

En primera instancia estos valores deben someterse a fuzzificación (**Figura III. 65**, **Figura III. 66** y **Figura III. 67**).

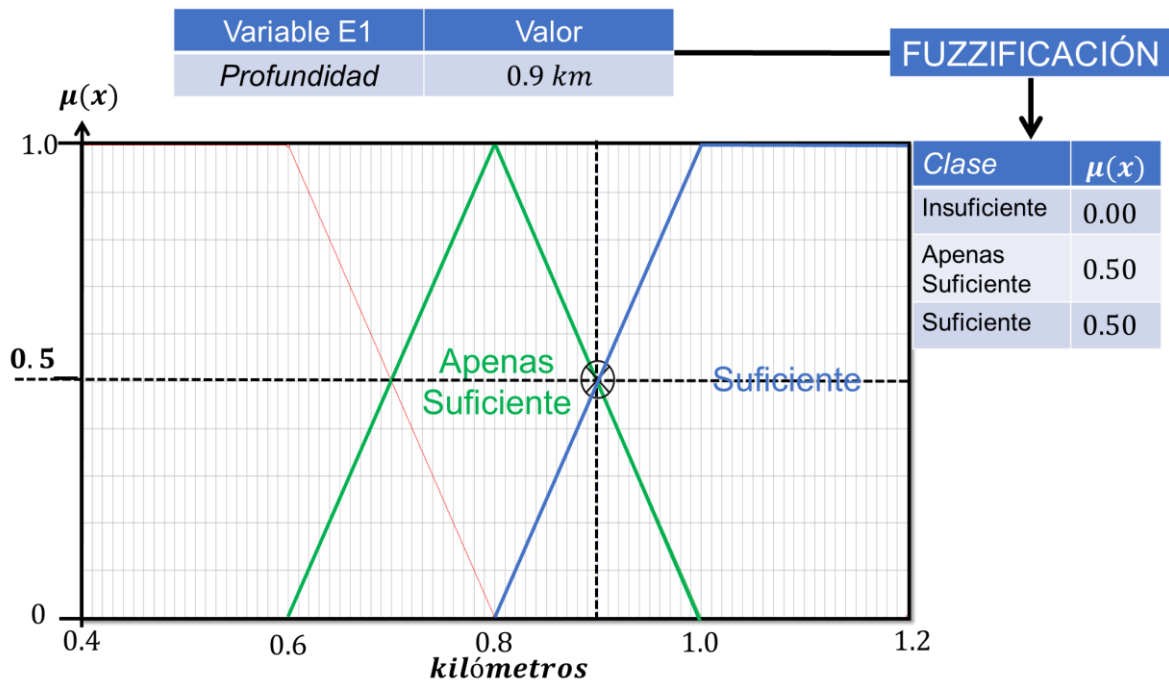


Figura III. 65. Fuzzificación de la variable Profundidad (0.9 kilómetros)

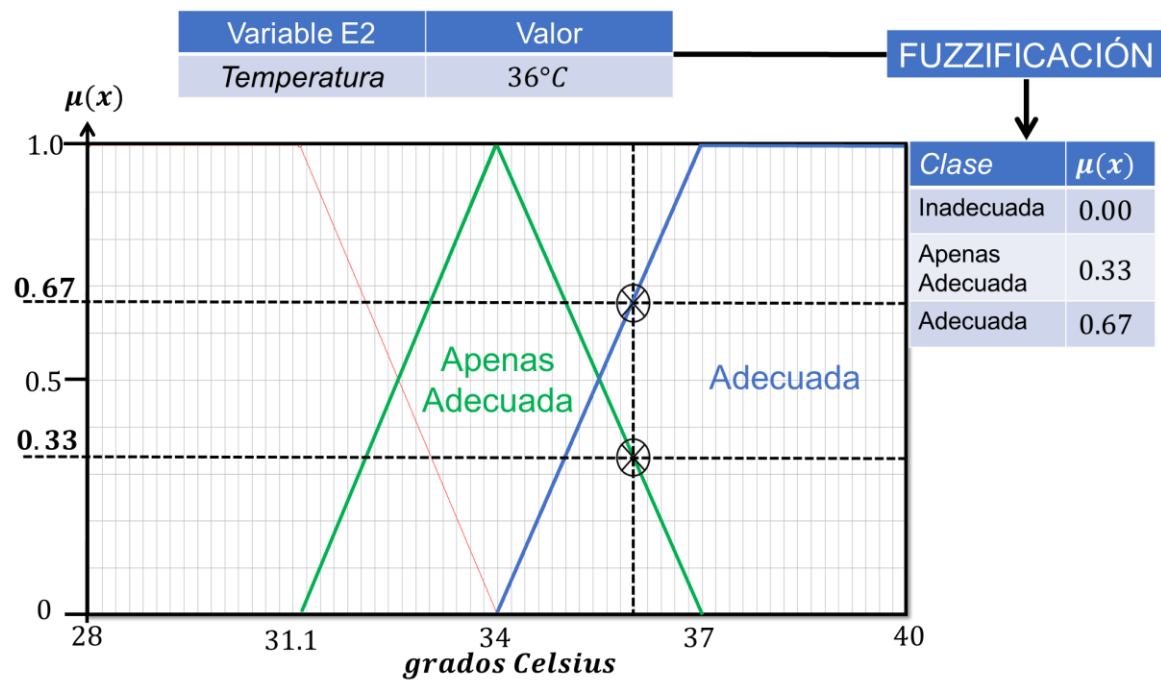


Figura III. 66. Fuzzificación de la variable Temperatura (36°C)

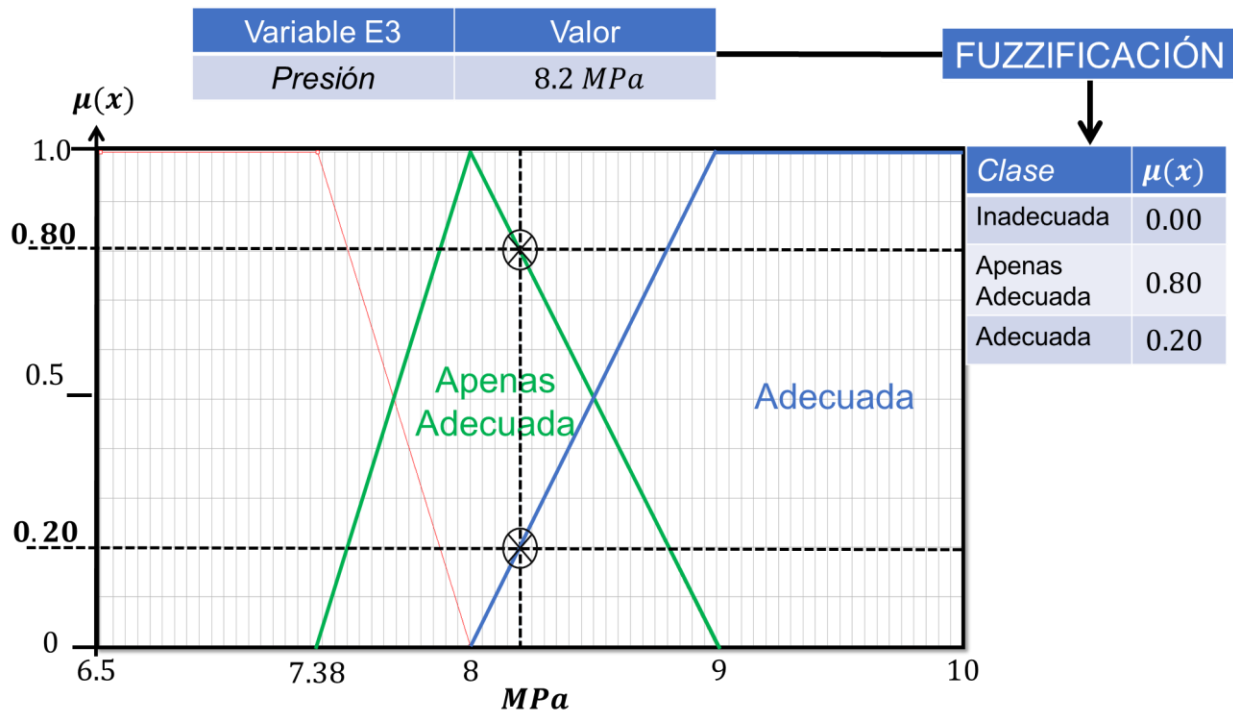


Figura III. 67. Fuzzificación de la variable *Presión* (8.2MPa)

Después se evalúan las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas, con el objetivo de obtener el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla, para este sistema se considera el operador AND de Zadeh. Se muestran dos ejemplos de este proceso: la regla 50 y la regla 72 (**Figura III. 68** y **Figura III. 69**).

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente.

Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto .

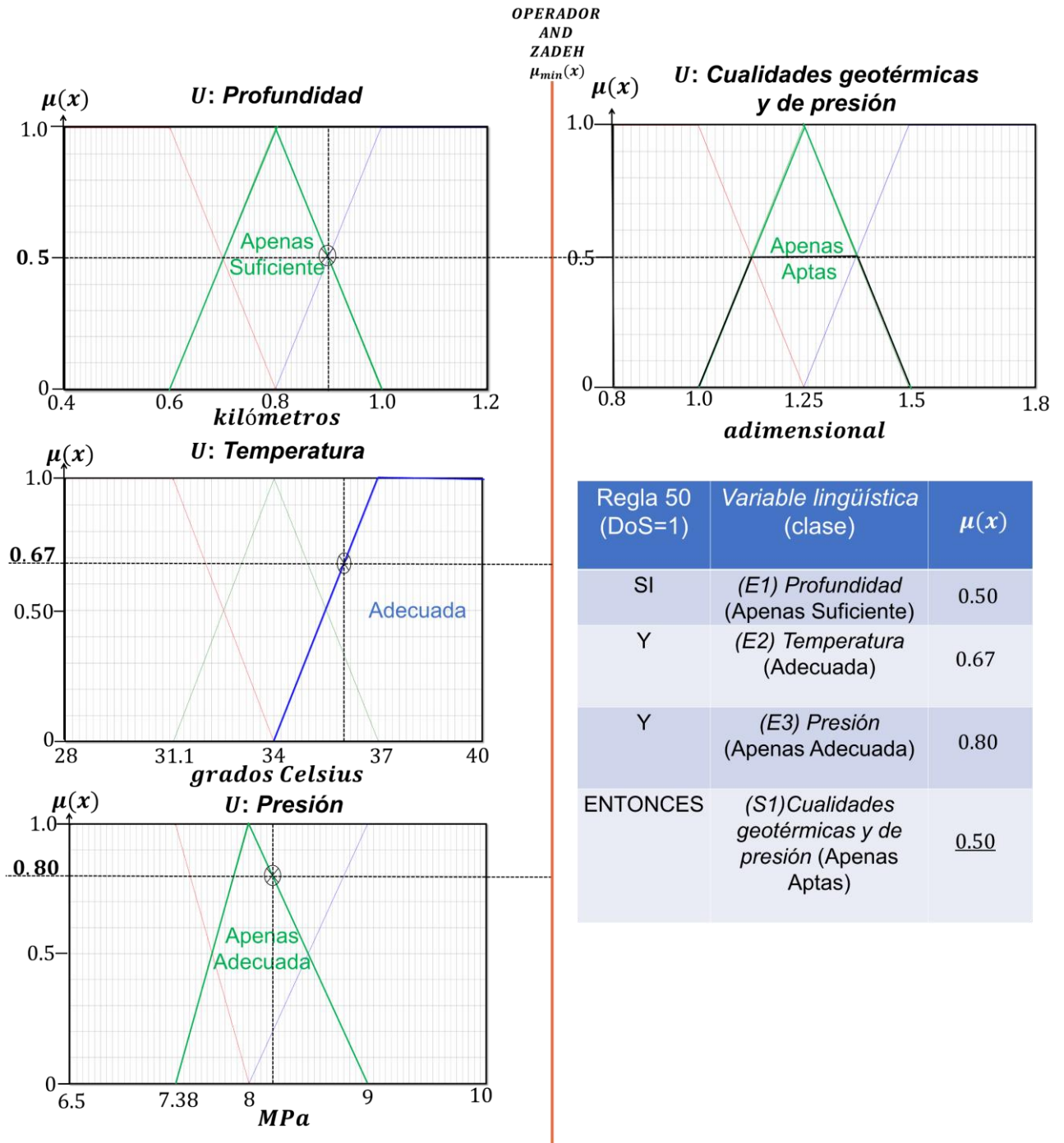


Figura III. 68. Proceso de análisis de la regla 50 para el ejemplo del sub sistema difuso.

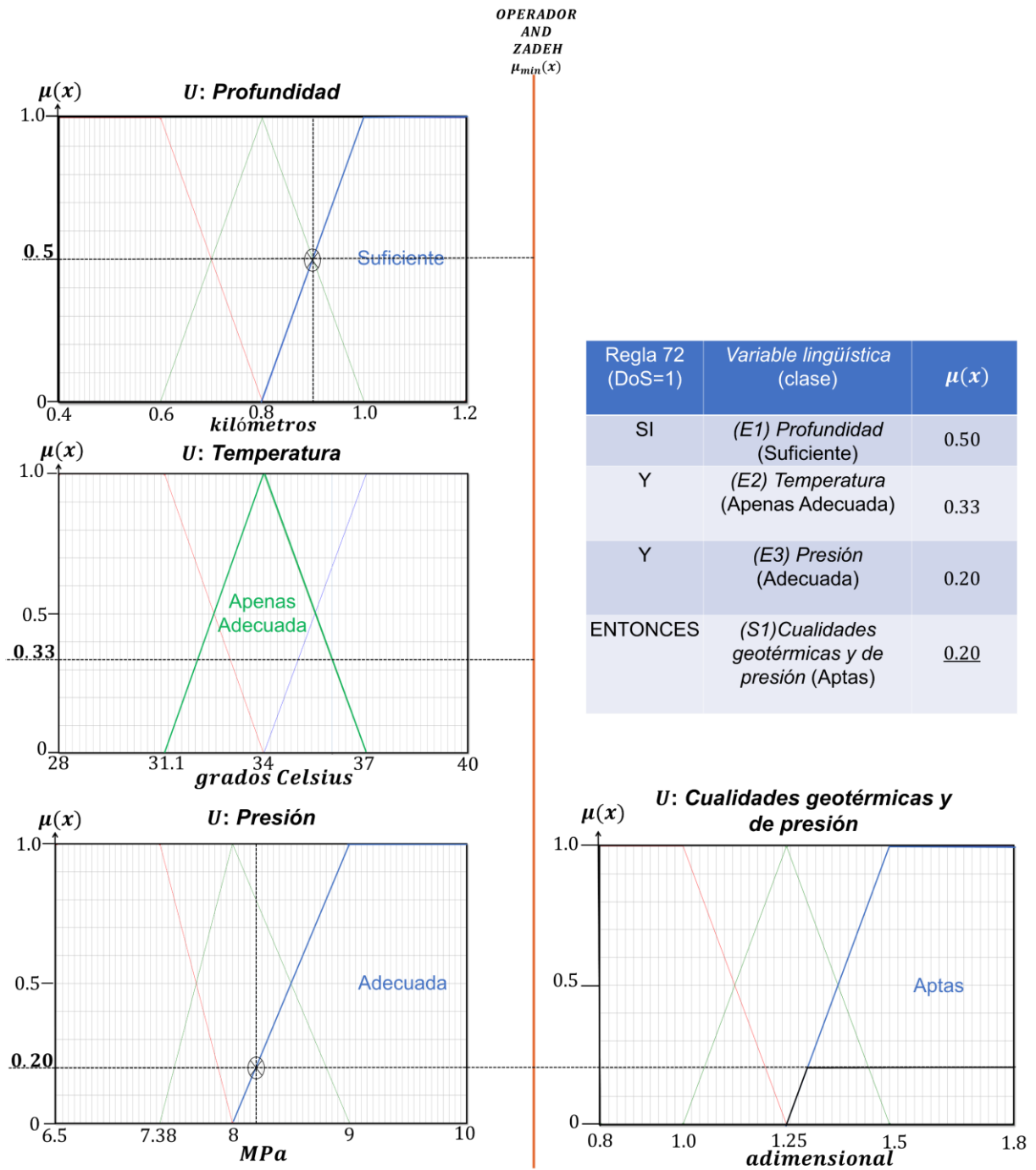


Figura III. 69. Proceso de análisis de la regla 72 para el ejemplo del sub sistema difuso.

Evaluadas las reglas y obtenidos los DoV se ejecuta la agregación que permitirá obtener la salida difusa (**Figura III. 70**). Es importante mencionar que la regla 50 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Apenas aptas* de la variable lingüística *Cualidades geotérmicas y de presión*.

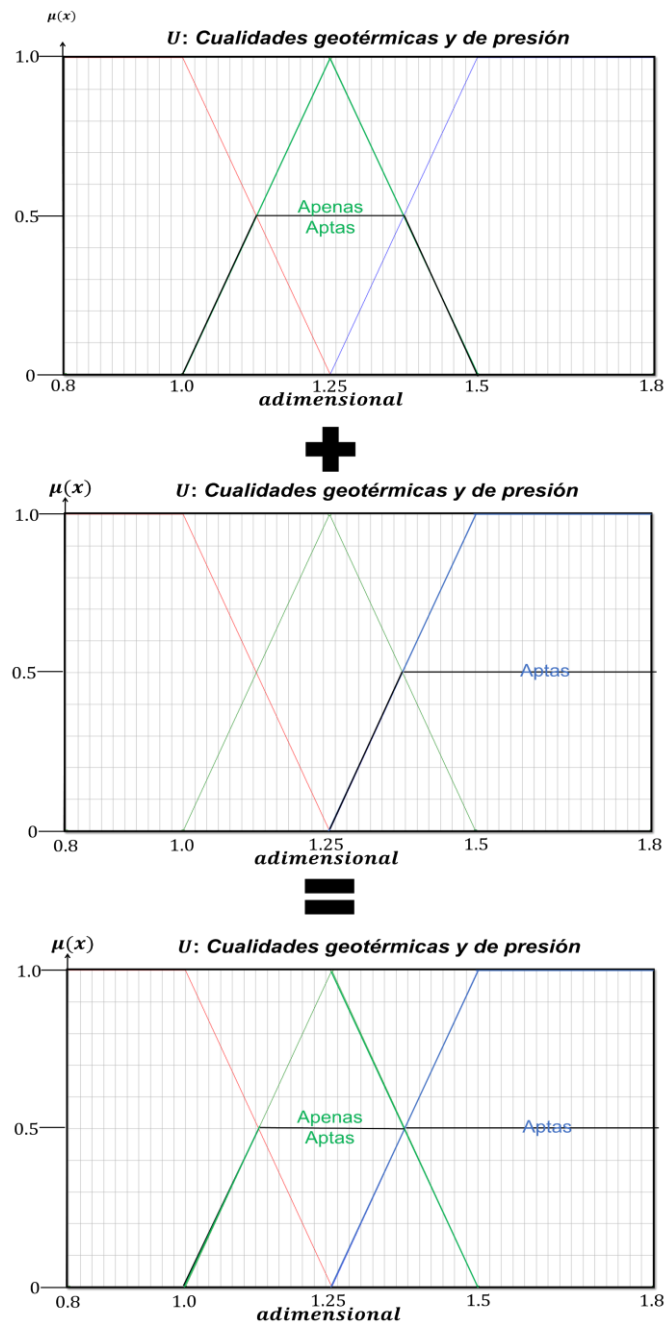


Figura III. 70 Proceso de agregación.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide (**Figura III. 71**). Para el ejemplo se concluye que el *Cualidades geotérmicas y de presión* pertenecen:

0.79 al conjunto Apenas Aptas

0.21 al conjunto Aptas

Con un valor de 1.45 en la base de la variable *Estado de la Emisión*.

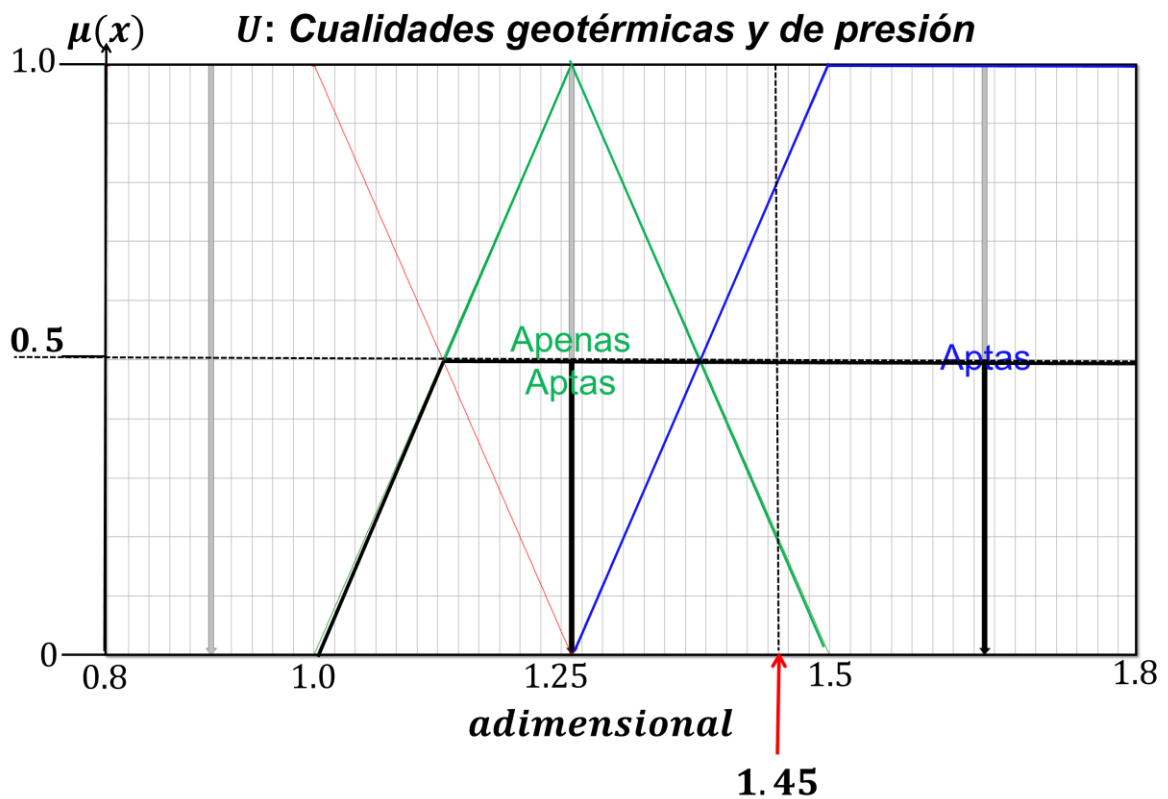


Figura III. 71. Defuzzificación mediante el método de centroide del ejercicio.

III.6 Régimen Hidrodinámico

La penúltima variable de este subsistema difuso ayuda a describir, de forma aproximada, el régimen hidrogeológico de la formación almacén y de las formaciones geológicas circundantes, tanto a techo como a muro. En esta investigación se eligen algunos aspectos para cubrir el objetivo: i) las zonas de carga y descarga, ii) las direcciones de flujo principales y iii) las posibles conexiones entre los acuíferos superiores e inferiores (para estimar tiempos de tránsito desde las zonas de inyección a los potenciales puntos de descarga así como conocer el grado de conexión entre aguas someras y profundas) (Bachu, 2000; CIEMAT, 2006; Mariño & Moreno, 2018).

Todas las cuencas sedimentarias cuentan con un sistema hidráulico que está dado por la superposición de formaciones de baja y alta permeabilidad y por el sistema de fracturas, el flujo de la cuenca se da en consecuencia de procesos tectónicos, erosivos y sedimentarios. El camino que tome el CO₂ estará determinado por este complejo sistema, buscando trazos de alta permeabilidad, interconexiones, fracturas y fallas, que lo conducirán hacia la superficie por efecto de la flotabilidad. Los mecanismos que controlan la hidrodinámica de la cuenca y el flujo subterráneo son esenciales para definir las estrategias de inyección y el almacenamiento geológico (CIEMAT, 2006; Ruíz, 2014).

La relación entre el tipo de cuenca y el flujo de aguas de formación (Bachu, 2000 & CIEMAT, 2006) puede describirse de forma general como:

- A. Aquellas en las que el flujo de agua de formación es expulsada de los acuitardos en dirección vertical y en dirección lateral hacia los márgenes de la cuenca, indican que el flujo está controlado por la compactación y es característico de cuencas situadas en la plataforma continental y en las zonas de subducción (**Figura III. 72 A**).
- B. En cuencas donde el agua se expelle hacia los márgenes debido a procesos orogénicos, donde el agua suele estar en altas concentraciones salinas, presurizada y caliente (condiciones que no favorecen al almacenamiento de CO₂) se indica que el flujo está controlado por compresión tectónica y se presenta en aquellas cuencas próximas a cinturones orogénicos activos (**Figura III. 72 B**).

- C. Aquellas cuencas controladas por rebote erosivo (elevación isostática – erosión) se caracterizan por conducir el flujo de forma vertical a los acuitardos conformados por pizarras y lateralmente hacia el dentro de la cuenca en los acuíferos poco potentes. Tanto los acuitardos como los acuíferos se caracterizan por estar a condiciones de bajo presión tornándolos los mejores candidatos para el atrapamiento hidrodinámico del CO_2 . Este tipo de flujo es característico de cuencas intracratónicas que han sufrido una reciente elevación y una erosión importante (**Figura III. 72 C**).
- D. En cuencas continentales, la topografía es el mecanismo que gobierna sobre el flujo del agua de formación, donde el flujo se origina en zonas de recarga y se dirige a zonas de descarga. Los acuíferos existentes se encuentran sometidos a presiones próximas a la hidrostática debido a que están controladas por la controladas por la distribución de la permeabilidad. En estas situaciones la inyección de CO_2 es preferible en las zonas de recarga, a fin de aumentar la longitud de las líneas de flujo y por tanto los tiempos de tránsito (**Figura III. 72 D**).

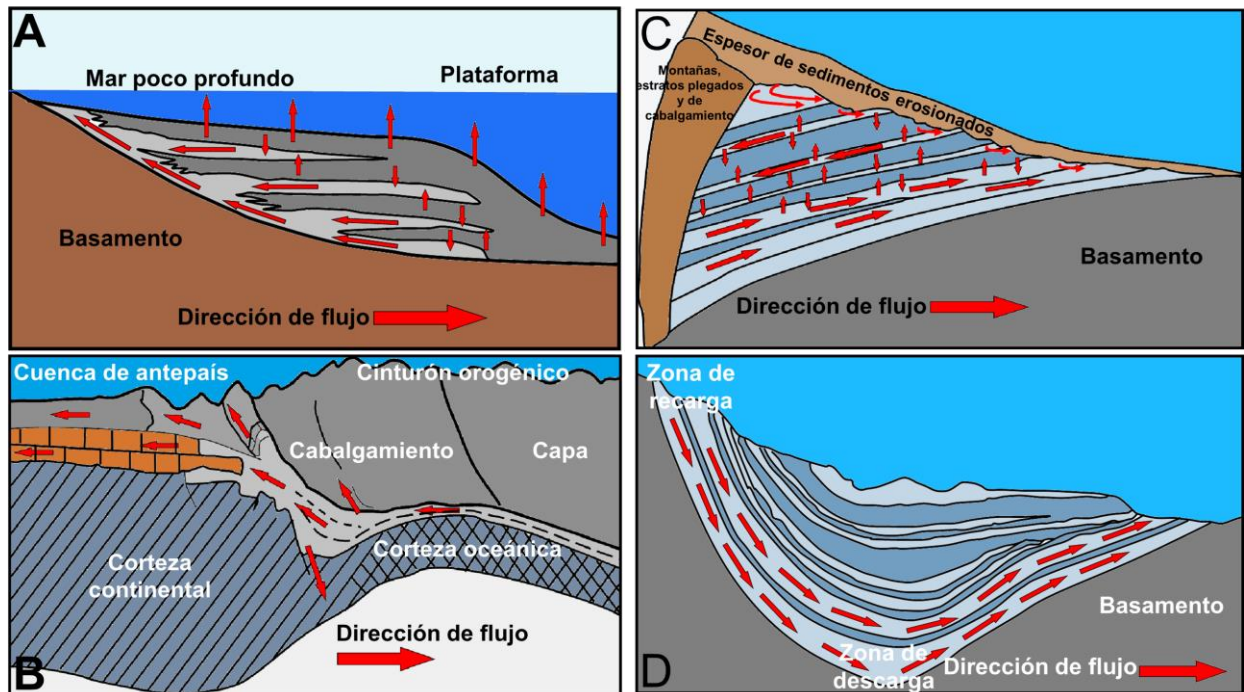


Figura III. 72. Representación esquemática del flujo de fluido impulsado por: A. la compactación, B. la compresión tectónica, C. rebote erosivo y D. por topografía (modificado de Bachu 2000).

Aquellas cuencas que presenten un flujo controlado por rebote erosivo o topografía resultan desde el punto de vista hidrodinámico las mejores candidatas para desarrollar un almacén geológico. Importante mencionar que estas cuencas no están exentas de la presencia de fugas, sin embargo el lapso de tiempo desde la inyección del gas hasta la primer manifestación de fuga puede ser muy largo, a una escala geológica, donde la vida promedio de un ser humano sería insuficiente para observar este fenómeno. Situación que incide favorablemente en el desarrollo del atrapamiento mineral (que permite retener el CO₂ de forma permanente en el medio geológico), siempre y cuando no se presenten procesos metamórficos y/o volcánicos. (Bachu, et al, 1994).

Dada la complejidad de la variable, se proponen las siguientes calificaciones para las funciones de membresía. Recuerde que este sistema auxilia en una etapa preliminar y no sustituye análisis más severos. Así, tome en consideración que (rango en base de variable -eje X- de 0 a 1):

- i) Hacia 1, ADECUADO, se asocia a una región cuyo régimen hidrodinámico garantiza un tiempo de tránsito de larga duración que favorezca el atrapamiento hidrodinámico y la mineralización de CO₂; considere que es preferible que la comunicación entre acuíferos someros y profundos no exista y que las vías de flujo no se dirijan a superficie. También se asocia a características de cuencas con régimen hidrodinámico controlado por rebote erosivo o por topografía.
- ii) Hacia 0, INADECUADO, se asocia a una región cuyo régimen hidrodinámico está gobernado por la compactación o compresión generando múltiples fracturas y fallamientos, potenciales vías de escape del gas a superficie. Además de que las vías de flujo se dirigen a superficie.

Los conjuntos difusos para la variable lingüística *Régimen Hidrodinámico* son: Inadecuado, Apenas Adecuado y Adecuado. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto inadecuado está en 0.3 o menos, para apenas adecuado en 0.5 y para adecuado en 0.8 (**Figura III. 73**).

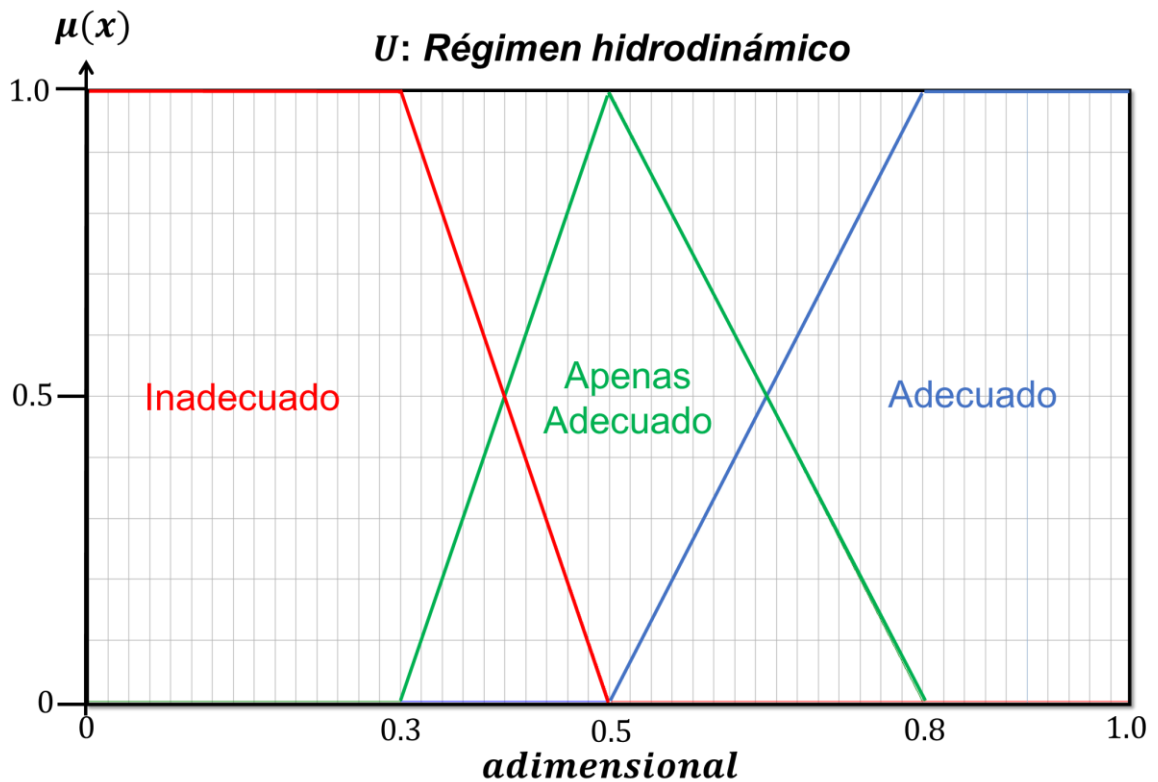


Figura III. 73. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística *Régimen hidrodinámico*.

Nota: De no existir información que permita calificar el *régimen hidrodinámico* de la cuenca, el usuario deberá decidir sí, con base en un análisis de bajo coste realizado por un experto se obtiene la información necesaria para calificar el régimen hidrodinámico o se desactiva esta variable en el sistema difuso.

III.7 Factores hidrogeoquímicos

Esta última variable no está presente en el sistema difuso, debido a que los factores que involucra no están disponibles públicamente, además su análisis detallado cuyo costo resulta oneroso, entre otras cosas, es necesario que el proyecto se encuentre en una etapa de inyección; recordar que este trabajo se centra en la información obtenida de una pre campaña de exploración cuyos costos no son elevados pero si lo suficientemente confiables para determinar cualitativamente la susceptibilidad de un sitio a fungir como almacén geológico. Sin embargo es necesario presentar esta variable con el objetivo de advertir a los interesados sobre los procesos que van a presentarse una vez se inyecte el CO_2 en el medio, las interacciones de este gas con los materiales presentes en el almacén, pueden alterar de manera importante las condiciones originales del medio y de esta forma comprender los efectos que tendrán sobre el almacenamiento. Por tanto el objetivo de esta variable es presentar dichas interacciones (IPCC, 2005; CIEMAT, 2006).

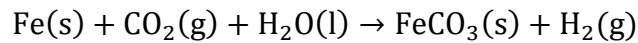
Una vez inyectado el CO_2 y tras la disolución del mismo en el agua de formación, se van a producir una serie de interacciones con los distintos materiales que discurren a lo largo de un almacenamiento geológico, como son los materiales del pozo de inyección, las rocas almacén y sello y la salmuera del yacimiento (Galarza, 2013); dichas interacciones se detallan a continuación:

A) Interacciones entre el CO_2 y los materiales del pozo de inyección.

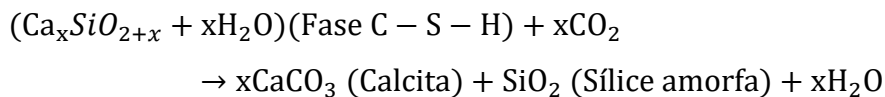
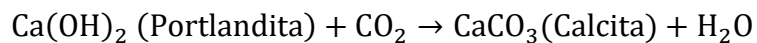
El CO_2 se inyecta a través de un pozo de inyección. Los materiales de los que habitualmente están compuestos son: acero al carbón, para la tubería de revestimiento; y cemento convencional como el Portland para rellenar el espacio existente entre el pozo y la formación de roca, así como para el sellado tras su abandono. Al inyectar el CO_2 en el medio este puede afectar a la estabilidad de los materiales del pozo, expuesto a un ambiente rico en CO_2 (CIEMAT, 2006, Galarza, 2013). Las reacciones que se presentan son:

Corrosión del acero: El acero lleva usándose ampliamente en la industria del petróleo, sin embargo sufren procesos de corrosión cuando se someten a ambientes ricos en cloruros y CO_2 . Inicialmente, y debido a la elevada alcalinidad (pH entre 12.5 y 13.5), se

forma una capa estable de óxido pasivo en la superficie del acero, protegiéndolo de la corrosión. Una vez se inyecta el CO_2 , éste reacciona con productos de hidratación del cemento, como el Ca(OH)_2 , provocando una disminución del pH hasta valores inferiores a 9, e induciendo a la pérdida de la película protectora del acero dejándolo, por tanto, expuestos a procesos de corrosión. El principal producto de corrosión es el carbonato de hierro (FeCO_3), formado según la siguiente reacción electroquímica (Pérez, 2009; Galarza, 2013):



Carbonatación del cemento: El CO_2 reacciona fácilmente con las fases de silicatos de calcio hidratados presentes en el cemento Portland. Dichas interacciones podrán dar lugar a la formación de calcita, dolomita y sílice amorfa según las siguientes reacciones:



Estas reacciones de carbonatación provocan cambios en la porosidad, densidad y textura del material, lo que podría afectar a la integridad del pozo, si bien serán relativamente lentas, debido a la baja permeabilidad y porosidad del cemento Portland.

La degradación del pozo puede desencadenar en una serie de fugas del CO_2 a través de varias posibles vías, como por ejemplo entre la unión del cemento y la roca de la formación, o entre el cemento y la tubería de revestimiento a través de las propias fracturas del cemento (Ramírez, 2011) (**Figura III. 74**).

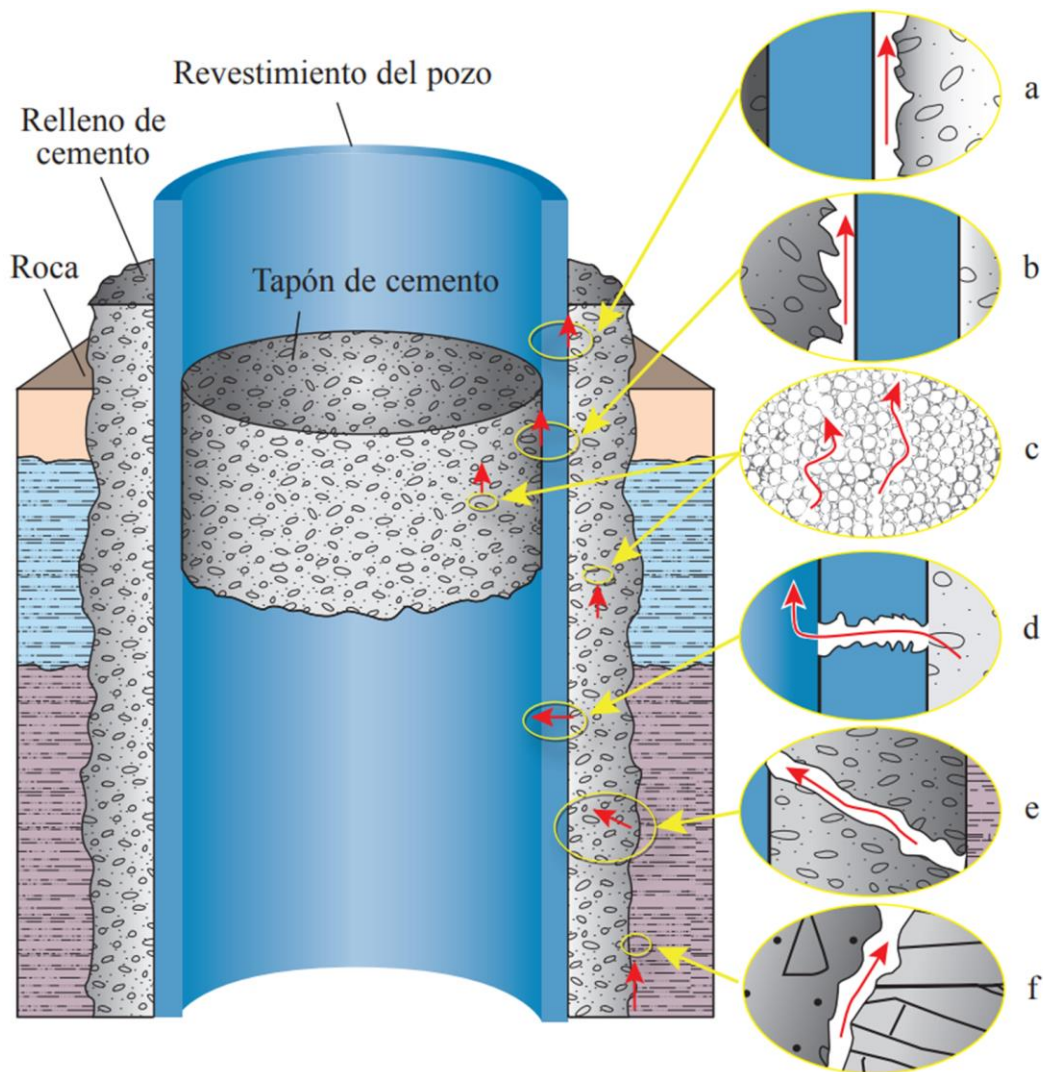
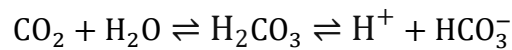


Figura III. 74. Posibles vías de escape del CO_2 en un pozo de inyección. Escapa por el material alterado (c, d, e) o a través de las interfases (a, b, f) (tomada de Galarza, 2013).

B) Interacciones entre el CO_2 , roca almacén o sello y la salmuera.

El estudio de estas interacciones permite predecir la capacidad del yacimiento de atrapar permanentemente el CO_2 en fase mineral, o lo que es lo mismo, la capacidad que tiene para que se produzca atrapamiento mineral. Las reacciones resultantes de interacción CO_2 -roca-salmuera están controlados por una serie de parámetros, como son la presión y temperatura del sistema, la mineralogía de la roca, la composición química del fluido entre poros y el contacto superficial entre la roca y dicho fluido. Además dichas

interacciones, podrían afectar parámetros como la porosidad y la permeabilidad o la inyectividad, pudiendo bloquear las vías preferentes de flujo (en las rocas de la formación almacén) o generar fugas, en el caso de un aumento excesivo de la porosidad/permeabilidad de la roca sello. Esto podría producir, incluso, la contaminación de los acuíferos superiores que constituyan posibles recursos hídricos de la zona (IPCC, 2005; Galarza, 2013). La primera reacción que tiene lugar es la disolución del CO_2 inyectado en la salmuera, provocando su acidificación según la reacción:



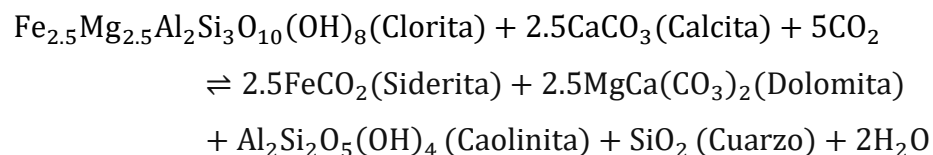
Estudios experimentales han demostrado que el añadir CO_2 supercrítico al sistema salmuera-roca, el contenido en ácido carbónico aumenta, provocando, por tanto, una disminución del pH de la disolución (con valores en torno a 3.5 y 4, en función de la composición química de la salmuera, formación litológica y la temperatura). Esta acidez favorece el ataque de minerales carbonatados, como la calcita, induciendo, en algunas condiciones, la precipitación de otras fases minerales, como el yeso o la anhidrita, al interactuar con los sulfatos presentes en la salmuera (Kaszuba et al, 2005).

En algunos estudios se concluye que, aun habiéndose tamponado el pH, por efecto de la disolución de carbonatos, es posible que la acidez de la salmuera pueda ser suficiente para atacar los minerales alumino-silicatados (arcillas y feldespatos) presentes en las rocas sedimentarias. Esto favorecería un atrapamiento mineral permanente, al actuar los aluminosilicatos como donadores de protones, favoreciendo la precipitación de carbonatos secundarios. Algunas alteraciones de silicatos se muestran a continuación (Rochelle, et al, 2004):

Alteración de feldespatos



Alteración de arcillas



Atendiendo a todo lo expuesto anteriormente, es fácil de entender entonces la necesidad de realizar una caracterización completa y detallada del emplazamiento que se vaya a seleccionar para llevar a cabo la inyección del CO₂; caracterización que conlleva el estudio de las propiedades (físicas y químicas), de las rocas almacén y sello, así como el análisis químico de la salmuera confinada en el subsuelo. (CIEMAT, 2006; Galarza, 2013).

Por tanto resulta necesario monitorear el almacén con el fin de poder actuar lo más rápido posible en presencia de fugas derivadas o provocadas por estas interacciones del gas con los diversos materiales, y de esta forma poder evitar problemas como la contaminación de estratos superiores o acuíferos explotables (Pérez, 2009; Ramírez, 2011; Galarza, 2013).

III.8 Salida: Susceptibilidad

La variable de salida del sistema difuso global es la *Susceptibilidad* de una cuenca sedimentaria a fungir como almacén geológico de CO₂. Entonces, el sistema está compuesto por las 6 variables de entrada:

- *Estado de la Emisión,*
- *Disponibilidad de infraestructura,*
- *Tectónica,*
- *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello,*
- *Cualidades geotérmicas y de presión y*
- *Régimen Hidrodinámico*

y 1 una variable de salida

- *Susceptibilidad.*

Con 1 bloque de reglas Si-Entonces compuesto de 2187 posibles producto de la combinación de las funciones de membresía de las variables de entrada con las funciones de membresía de la variable de salida (720 con DoS= 1, 180 con DoS= 0.5 y 1287 con DoS=0). A su vez se presentan los sub sistemas difusos que permiten determinar a cuatro de las variables de entrada y se hace mención del número de reglas posibles de cada sub sistema

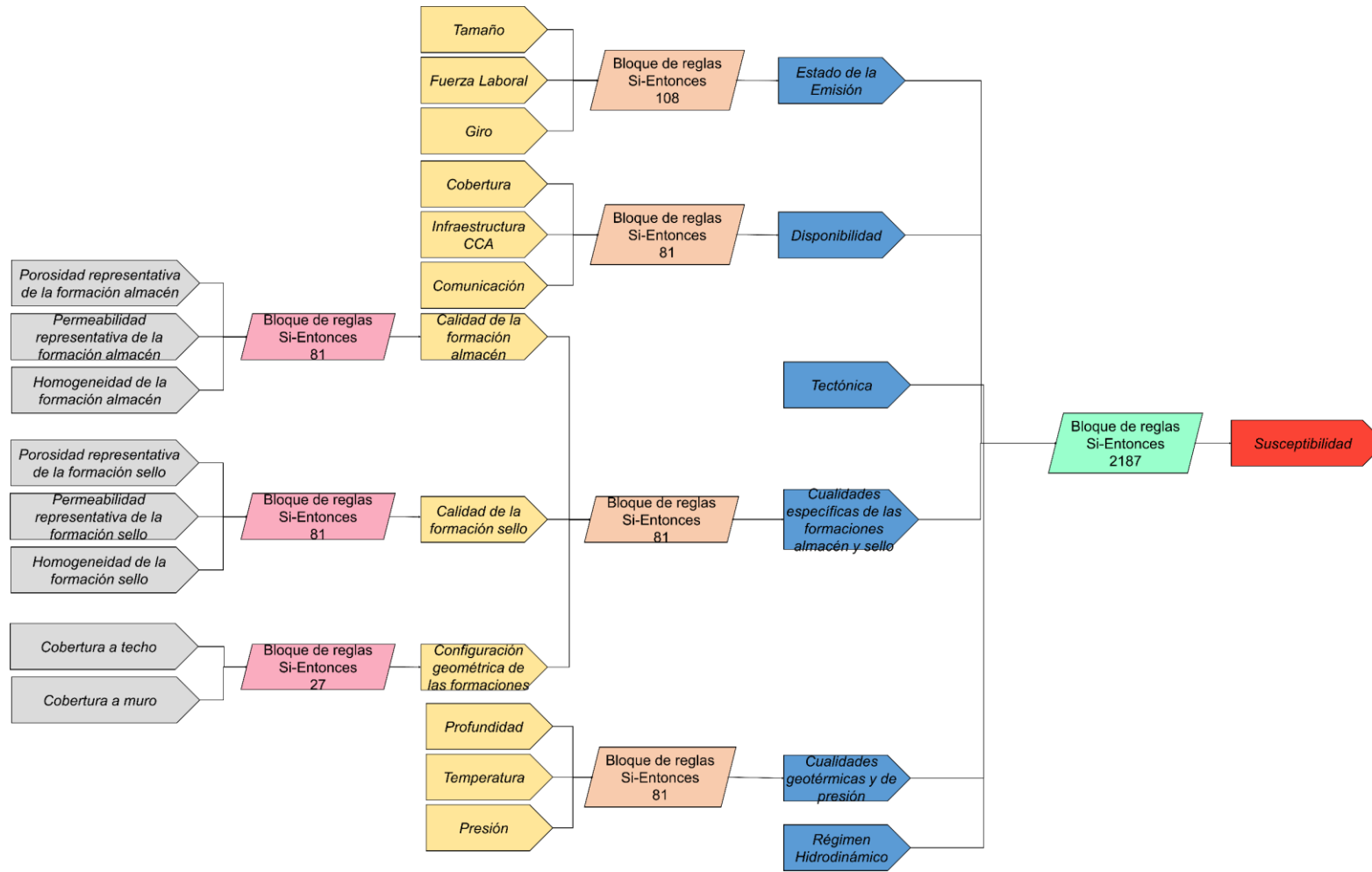


Figura III. 75. Sistema Global Difuso configurado por 6 variables de entrada y una variable de salida. A su vez se presentan los sub sistemas difusos que permiten determinar a cuatro de las variables de entrada y se hace mención del número de reglas posibles de cada sub sistema y del sistema global

Los conjuntos difusos de la variable de salida *Susceptibilidad* son Nula, Moderada y Alta. Las funciones de membresía elegidas son triángulos y trapecios donde los valores de máxima pertenencia (típicos) para el conjunto nula están en 0.15 o menos, para moderada en 0.45 y para extrema en 0.75 o más (Figura III. 76).

Los límites de estos conjuntos se establecieron con base en ensayos *prueba y error* con diferentes tamaños de base hasta obtener resultados plausibles sobre casos típicos.

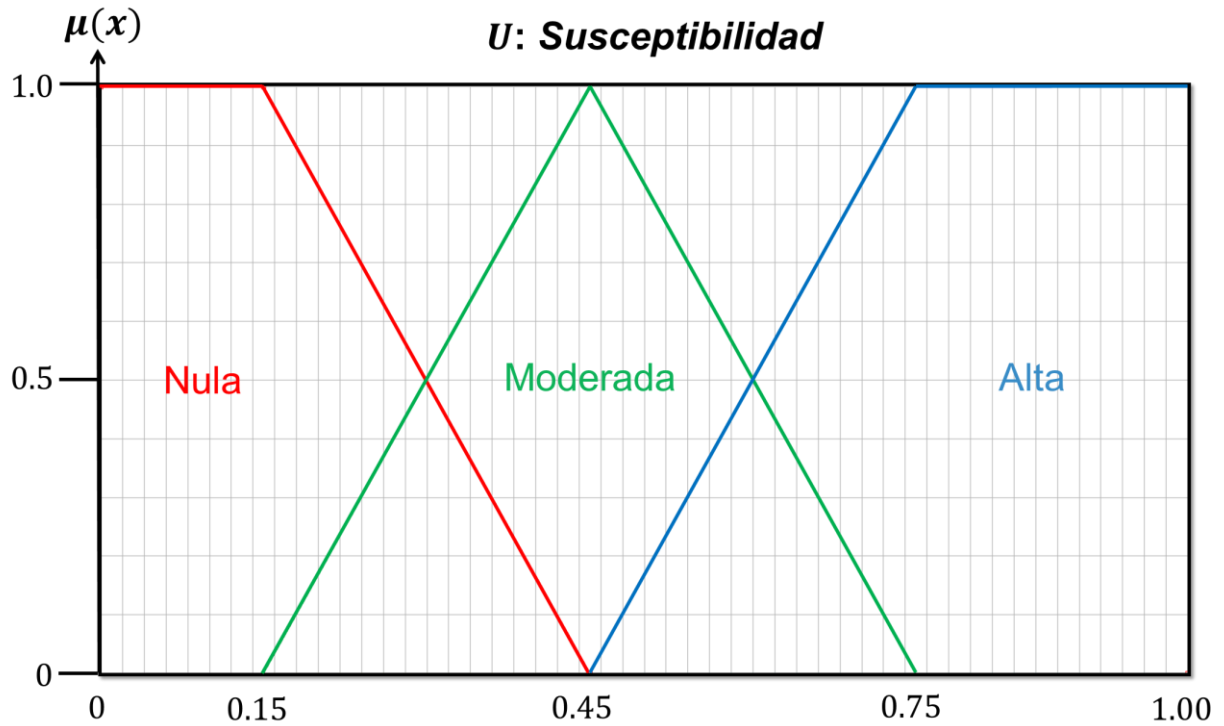


Figura III. 76. Funciones de membresía de los conjuntos difusos que forman parte del universo de discurso de la variable lingüística de salida *Susceptibilidad*.

Tabla III. 9. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Susceptibilidad*

Regla	Estado de la Emisión	Disponibilidad de Infraestructura	Tectónica	Cualidades específicas de las formaciones.	Cualidades geotérmicas y de presión	Régimen hidroclimático	Susceptibilidad	DoS
1	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Estable	Y No Aptas	Y No Aptas	Y Inadecuado	ENTONCES Nula	1.00
28	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Estable	Y Moderadamente Aptas	Y No Aptas	Y Inadecuado	ENTONCES Nula	1.00
41	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Estable	Y Moderadamente Aptas	Y Apenas Aptas	Y Apenas Adecuada	ENTONCES Moderada	0.50
122	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Moderadamente Estable	Y Moderadamente Aptas	Y Apenas Aptas	Y Apenas Adecuada	ENTONCES Moderada	0.50
163	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Inestable	Y No Aptas	Y No Aptas	Y Inadecuado	ENTONCES Nula	1.00
165	SI Irrelevante	Y Mínima	Y Inestable	Y No Aptas	Y No Aptas	Y Inadecuado	ENTONCES Alta	0.00
286	SI Irrelevante	Y Moderada	Y Estable	Y Moderadamente Aptas	Y Apenas Aptas	Y Adecuado	ENTONCES Moderada	1.00
343	SI Irrelevante	Y Moderada	Y Moderadamente Estable	Y No Aptas	Y Aptas	Y Inadecuado	ENTONCES Nula	1.00
567	SI Irrelevante	Y Total	Y Estable	Y Aptas	Y Aptas	Y Adecuado	ENTONCES Alta	0.50
1053	SI Notable	Y Moderada	Y Estable	Y Aptas	Y Aptas	Y Adecuado	ENTONCES Alta	1.00
1165	SI Notable	Y Moderada	Y Inestable	Y Moderadamente Aptas	Y No Aptas	Y Apenas Adecuado	ENTONCES Nula	1.00

Tabla III. 10. Reglas difusas para el sub sistema difuso de la variable lingüística *Susceptibilidad*

Regla	Estado de la Emisión	Disponibilidad de Infraestructura	Tectónica	Cualidades específicas de las formaciones.	Cualidades geotérmicas y de presión	Régimen hidrodinámico	Susceptibilidad	DoS							
1457	SI	Notable	Y	Total	Y	Inestable	Y	Aptas	Y	Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Moderada	0.50
1610	SI	Extremo	Y	Mínima	Y	Moderadamente Estable	Y	Aptas	Y	Apenas Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Moderada	1.00
1772	SI	Extremo	Y	Moderada	Y	Estable	Y	Aptas	Y	Apenas Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Moderada	1.00
1854	SI	Extremo	Y	Moderada	Y	Moderadamente Estable	Y	Aptas	Y	Apenas Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Alta	1.00
2023	SI	Extremo	Y	Total	Y	Estable	Y	Aptas	Y	Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Nula	0.00
2025	SI	Extremo	Y	Total	Y	Estable	Y	Aptas	Y	Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Alta	1.00
2032	SI	Extremo	Y	Total	Y	Moderadamente Estable	Y	No Aptas	Y	No Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Nula	1.00
2057	SI	Extremo	Y	Total	Y	Moderadamente Estable	Y	Moderadamente Aptas	Y	No Aptas	Y	Apenas Adecuado	ENTONCES	Moderada	1.00
2097	SI	Extremo	Y	Total	Y	Moderadamente Estable	Y	Aptas	Y	Apenas Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Alta	1.00
2107	SI	Extremo	Y	Total	Y	Inestable	Y	No Aptas	Y	No Aptas	Y	Inadecuado	ENTONCES	Nula	1.00
2185	SI	Extremo	Y	Total	Y	Inestable	Y	Aptas	Y	Aptas	Y	Adecuado	ENTONCES	Nula	1.00

Recuerde que, de las seis variables de entrada, tres están configuradas como sub sistemas y una es un sistema anidado.

La **primera variable *Estado de la Emisión***, se configura como sub sistema con tres variables de entrada: *Tamaño*, *Fuerza Laboral* y *Giro*; un bloque de inferencia compuesto por 144 reglas Si-Entonces y una variable de salida :*Estado de la Emisión* (**Figura III. 77**).

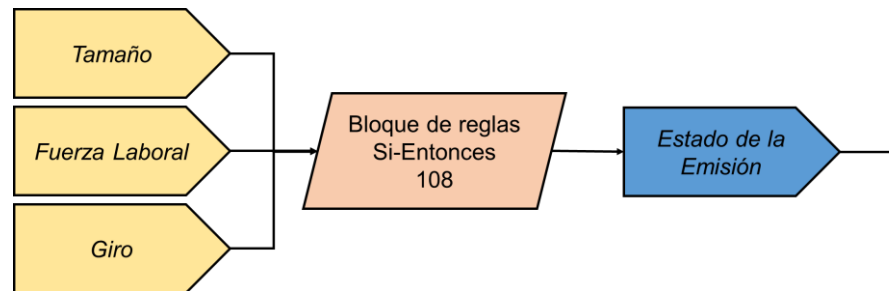


Figura III. 77. Esquema que muestra la configuración de la primera variable del sistema difuso global: *Estado de la Emisión*; que permite analizar cualitativamente el impacto negativo de las emisiones producidas por la industria fija en un sitio específico.

La **segunda variable *Disponibilidad***, es en un sub sistema conformado por tres variables de entrada: *Cobertura* de gasoductos en el parque industrial, *Infraestructura de CCA* y *Comunicación* entre la captura y la inyección del CO₂; un bloque de inferencia compuesto por 81 reglas Si-Entonces y una variable de salida: *Disponibilidad* (**Figura III. 78**).

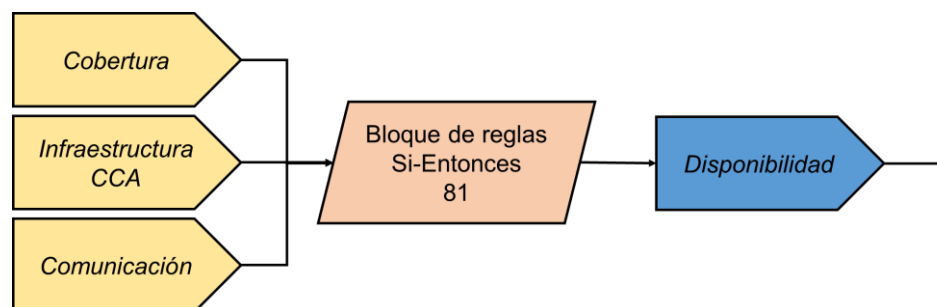


Figura III. 78. Esquema que muestra la configuración de la segunda variable del sistema difuso global: *Disponibilidad*; que permite analizar cualitativamente si la infraestructura existente dentro un parque industrial y aquella que conecta hacia el exterior puede utilizarse y/o acondicionarse para el transporte del CO₂ hasta el sitio de almacén.

La **tercera variable** del sistema difuso global es ***Tectónica***, una variable de entrada directa mientras que la **cuarta variable: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*** se estructura como sub sistema con tres variables de entrada: *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica*; un bloque de inferencia compuesto por 81 reglas Si-Entonces y una variable de salida: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello* (**Figura III. 79**).

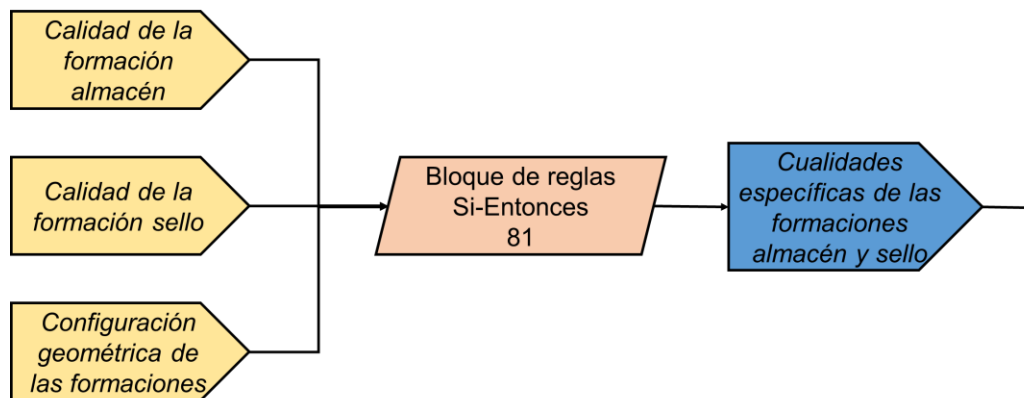


Figura III. 79. Esquema que muestra la configuración de la cuarta variable del sistema difuso global: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*; analiza cualitativamente si las propiedades de las formaciones geológicas que configuran al sitio almacén candidato permiten almacenar grandes cantidades de CO₂ y que este pueda estar almacenado sin riesgo de fugas.

Para **la cuarta variable** se tiene un primer sub sistema con *Porosidad representativa de la formación almacén*, *Permeabilidad representativa de la formación almacén* y *Homogeneidad de la formación almacén* como variables de entrada cuenta con un bloque de inferencia compuesto por 81 reglas Si – Entonces y una salida *Calidad de la formación almacén*. Otro de los sub sistemas, con *Porosidad representativa de la formación sello*, *Permeabilidad representativa de la formación sello* y *Homogeneidad de la formación sello* como entradas tiene un bloque de inferencia compuesto por 81 reglas Si-Entonces y una salida *Calidad de la formación sello*. Por último, el que se conforma por 2 variables de entrada: *Cobertura a techo* y *Cobertura a muro*; un bloque de inferencia con 27 reglas Si-Entonces y una variable de salida: *Configuración geométrica de las formaciones*.

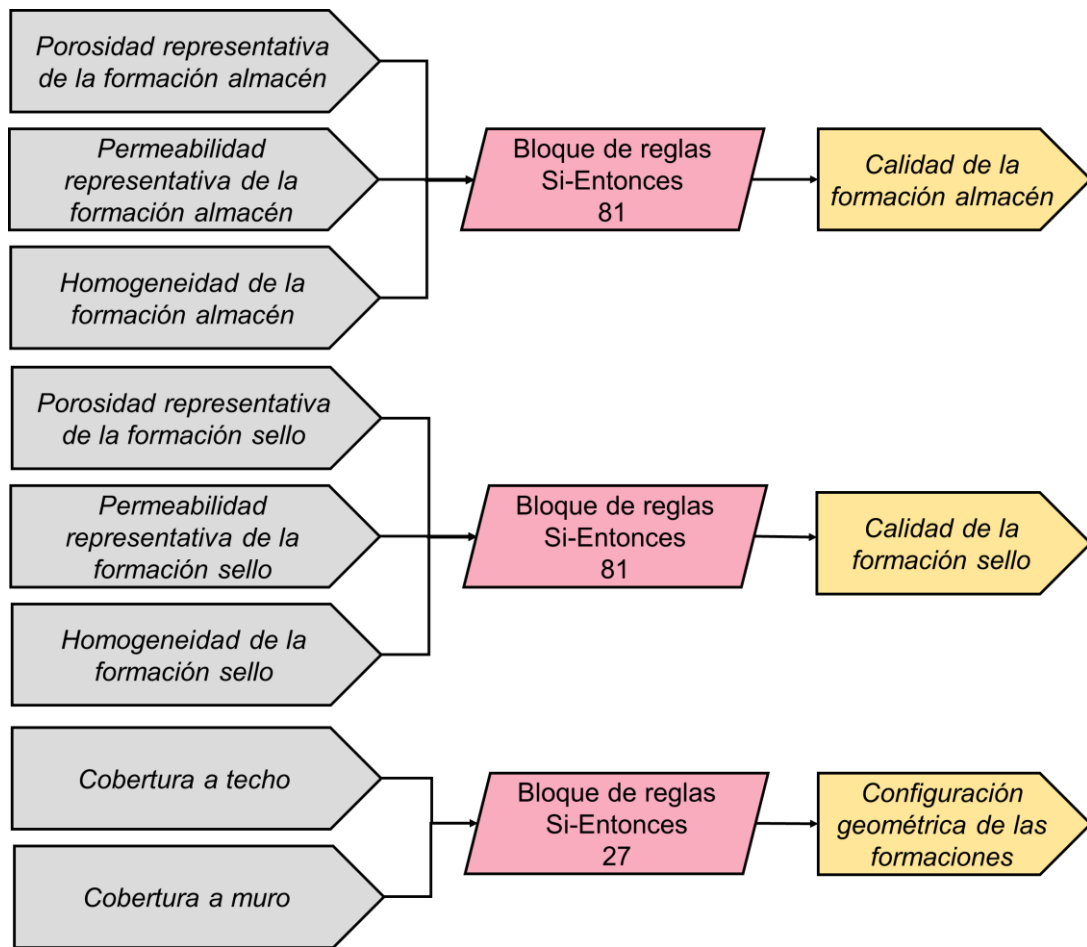


Figura III. 80. Esquema de sub sistemas anidados que permiten calificar la cuarta variable del sistema difuso global: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*, el primer elemento que las califica es la *Calidad de la formación almacén* (califica el espacio poroso disponible para almacenar), el segundo elemento es la *Calidad de la formación sello* (califica si la formación sello es útil como barrera impermeable) y el último elemento es la *Configuración geométrica de las formaciones* (califica si la formación sello es lo suficientemente extensa para cubrir a la formación almacenadora).

La **quinta variable Cualidades geotérmicas y de presión**, es un sub sistema compuesto por tres variables de entrada: *Profundidad*, *Temperatura* y *Presión*; un bloque de inferencia compuesto por 81 reglas Si-Entonces y una salida *Cualidades geotérmicas y de presión* (**Figura III. 81**).

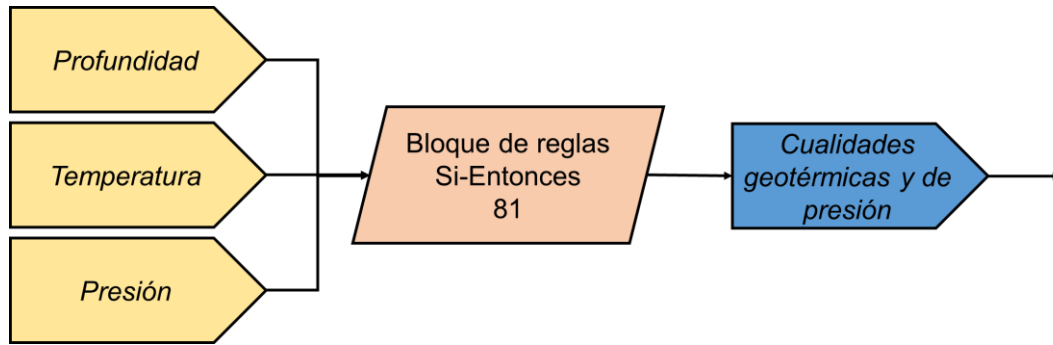


Figura III. 81. Esquema que muestra la configuración de la quinta variable del sistema difuso global: *Cualidades geotérmicas y de presión*, que califican cualitativamente si las condiciones de presión, temperatura y por ende profundidad permiten que el CO₂ pueda inyectarse y almacenarse en fase supercrítica.

La **sexta variable *Régimen Hidrodinámico*** al igual que la tercera es una variable de entrada directa. Estas seis variables las que permiten calificar la salida: *Susceptibilidad*, mediante un motor de inferencia compuesto por 752 reglas Si-Entonces (**Figura III. 82**).

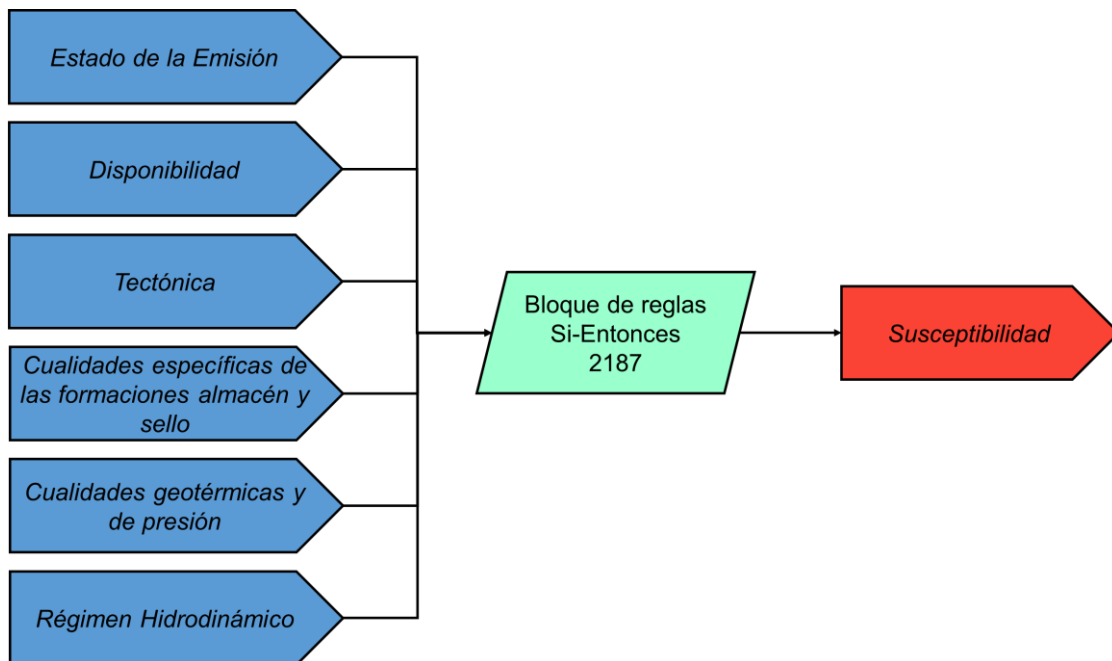


Figura III. 82. Esquema que muestra la configuración del sistema difuso global. Califica de manera cualitativa la susceptibilidad de un sitio a fungir como almacén geológico de CO₂.

III.9 Ejercicio de aplicación.

De manera hipotética y con el fin de ilustrar el funcionamiento de este sistema difuso se plantea que: en alguna región de sureste mexicano se pretende realizar un proyecto de almacenamiento geológico de CO₂ y por tanto se desea explorar su susceptibilidad. Los datos necesarios para esta análisis se concentran en la **Tabla III. 11**.

Para este ejercicio se tomaron datos reales de yacimientos del sureste mexicano, dicha información proviene del SIMPPI (Sistema Mexicano de Promoción de Parques Industriales), Téllez (2014), Anaya (2015) y Barrueta (2020).

Tabla III. 11. Información requerida para el ejercicio de aplicación.

<i>Variable 1: Estado de la Emisión</i>	<i>Valor (unidad)</i>
<i>Tamaño</i>	64 (hectáreas)
<i>Fuerza Laboral</i>	3700 (empleados)
<i>Giro</i>	31.9 (porcentaje de aporte)
<i>Variable 2: Disponibilidad</i>	<i>Valor (unidad)</i>
<i>Cobertura</i>	30 (porciento)
<i>Infraestructura CCA</i>	10 (porciento)
<i>Comunicación</i>	60 (porciento)
<i>Variable 3: Tectónica</i>	<i>Valor (unidad)</i>
<i>Tectónica</i>	0.05 (adimensional)
<i>Variable 4: Cualidades específicas de las formaciones</i>	<i>Valor (unidad)</i>
<i>Sub sistema 1:</i>	
<i>Calidad de la formación almacén.</i>	
<i>Porosidad representativa del almacén</i>	21 (porciento)
<i>Permeabilidad representativa de la formación almacén</i>	100 (mD)
<i>Homogeneidad de la formación almacén</i>	75 (porciento)
<i>Sub sistema 2:</i>	
<i>Calidad de la formación sello</i>	
<i>Porosidad representativa del sello</i>	5 (porciento)
<i>Permeabilidad representativa de la formación sello</i>	0.1 (mD)

<i>Homogeneidad de la formación sello</i>	80 (porcentaje)
Sub sistema 3: <i>Configuración geométrica de las formaciones</i>	
<i>Cobertura a techo</i>	1.25 (adimensional)
<i>Cobertura a muro</i>	0.70 (adimensional)
<i>Variable 5: Estado de la Emisión</i>	Valor (unidad)
<i>Profundidad</i>	1 (km)
<i>Temperatura</i>	115 (°C)
<i>Presión</i>	26.477 (MPa)
<i>Variable 6: Régimen Hidrodinámico</i>	Valor (unidad)
<i>Régimen Hidrodinámico</i>	0.7 (adimensional)

En primera instancia estos valores deben someterse a fuzzificación (**Figura III. 83** a la **Figura III. 101**):

Variable 1: Estado de la Emisión

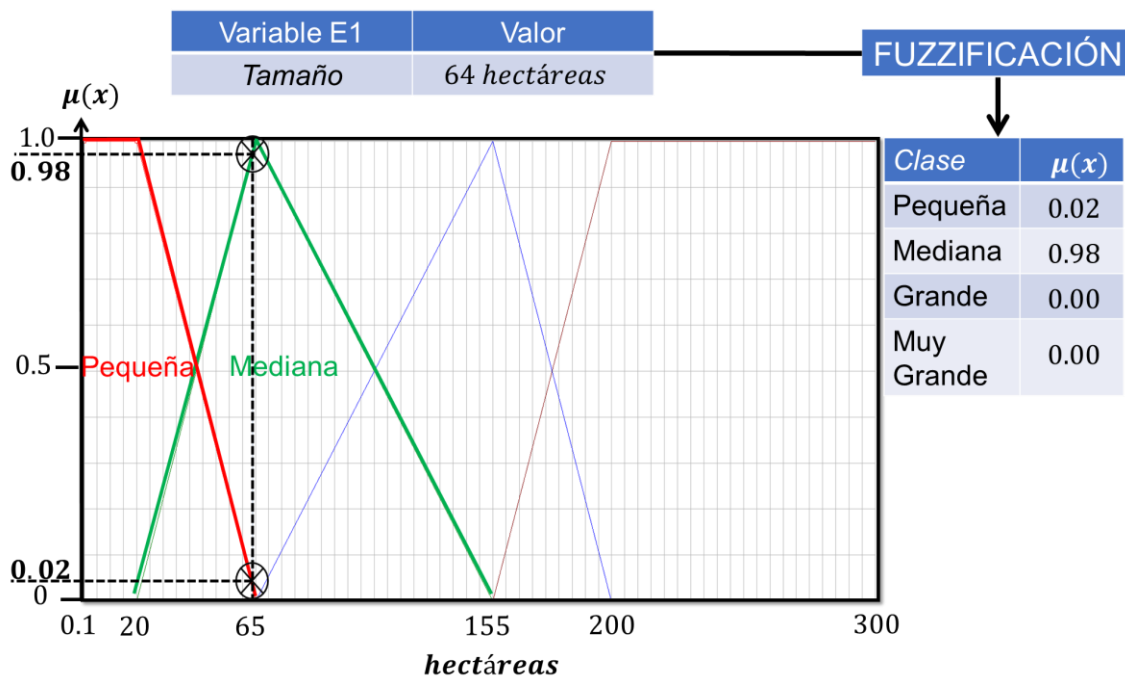


Figura III. 83. Fuzzificación de la variable *Tamaño* (64 hectáreas)

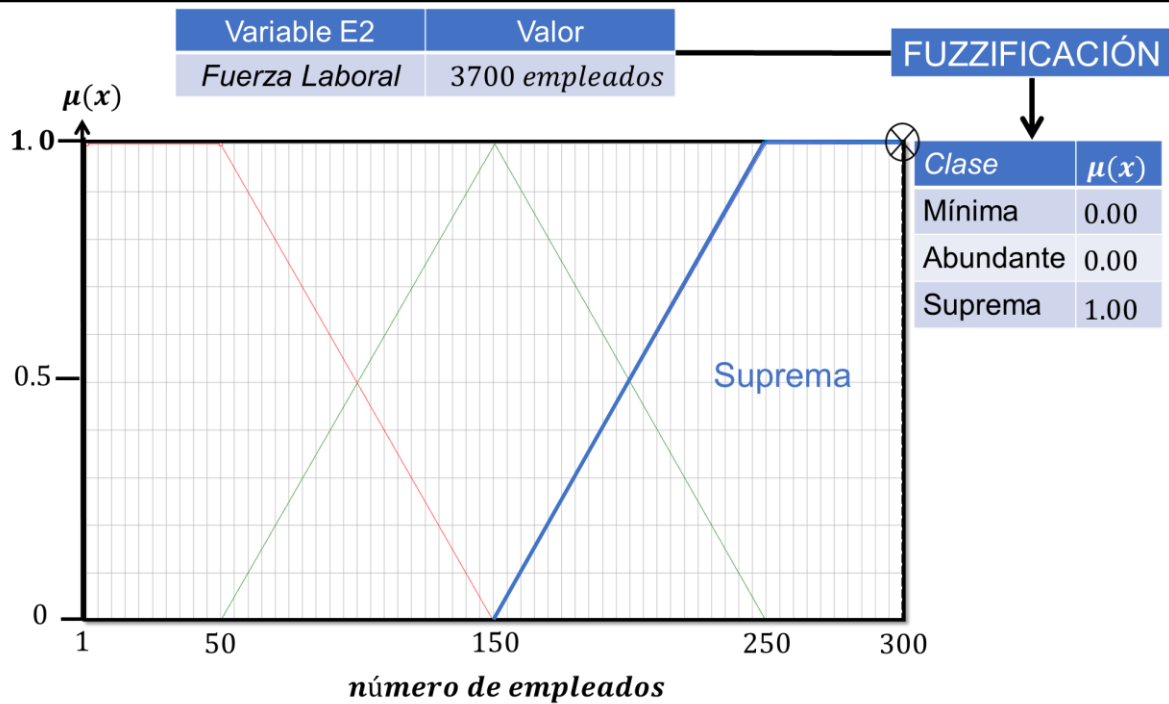


Figura III. 84. Fuzzificación de la variable *Fuerza laboral* (3700 empleados)

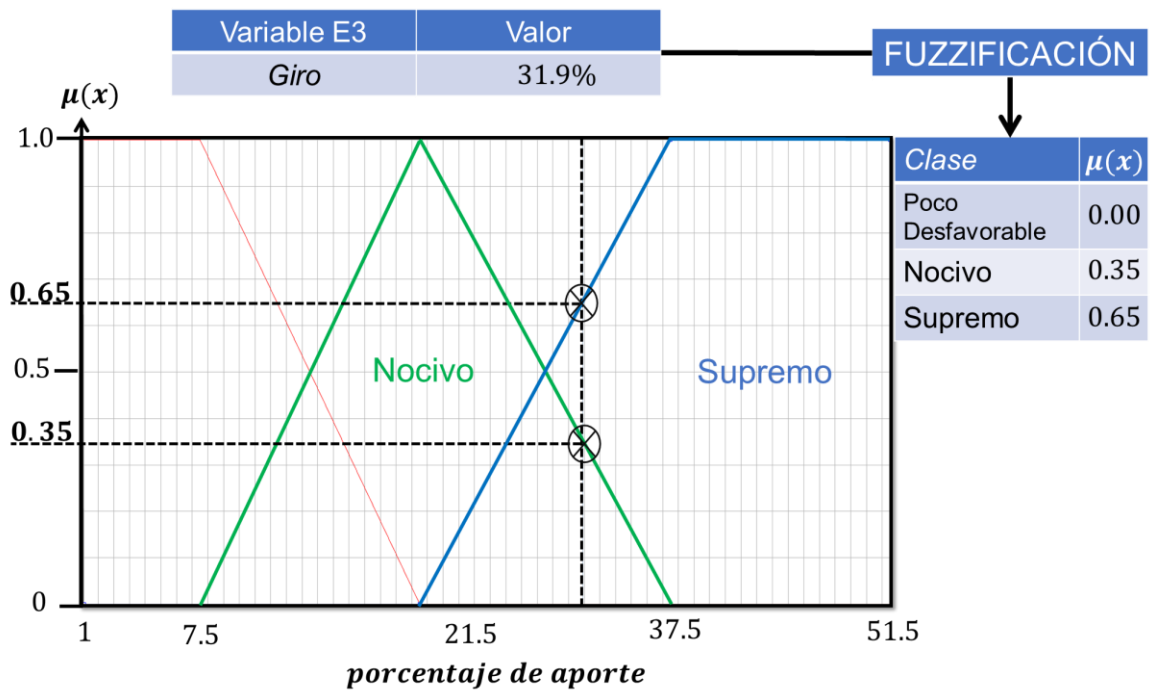


Figura III. 85. Fuzzificación de la variable *Giro* (31.9 por ciento de aporte)

Variable 2: Disponibilidad

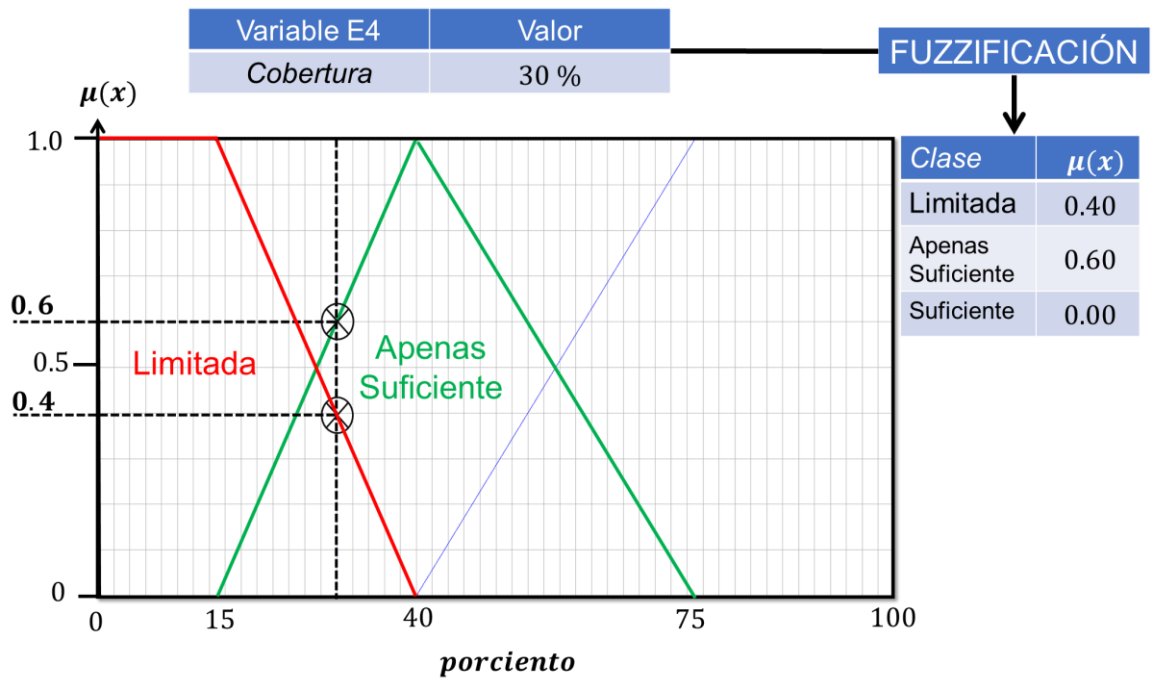


Figura III. 86. Fuzzificación de la variable Cobertura (30 %)

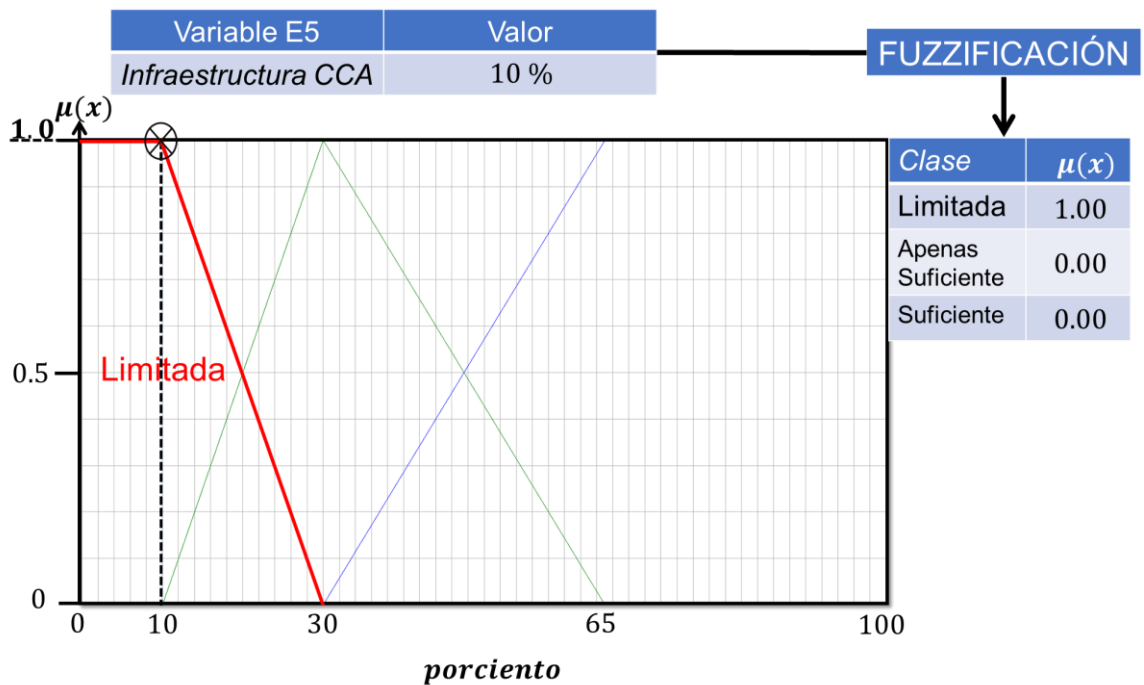


Figura III. 87. Fuzzificación de la variable Infraestructura CCA (10 %)

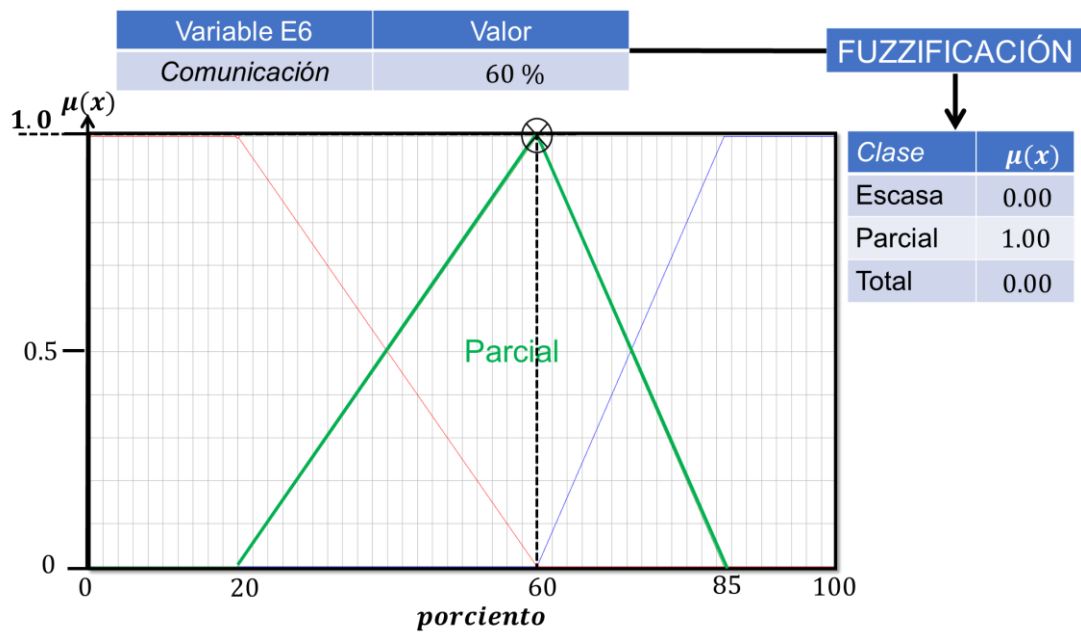


Figura III. 88. Fuzzificación de la variable *Comunicación* (60 %)

Variable 3: *Tectónica*

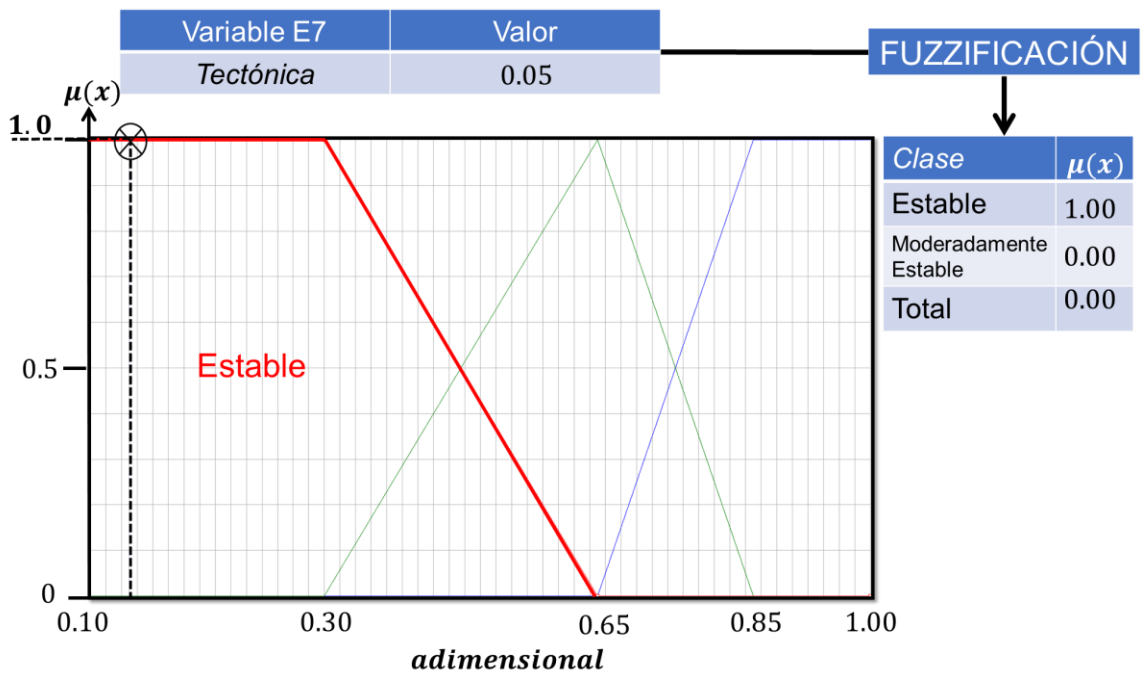


Figura III. 89. Fuzzificación de la variable *Tectónica* (0.05)

Variable 4: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello. SS1 Calidad de la formación almacén.*

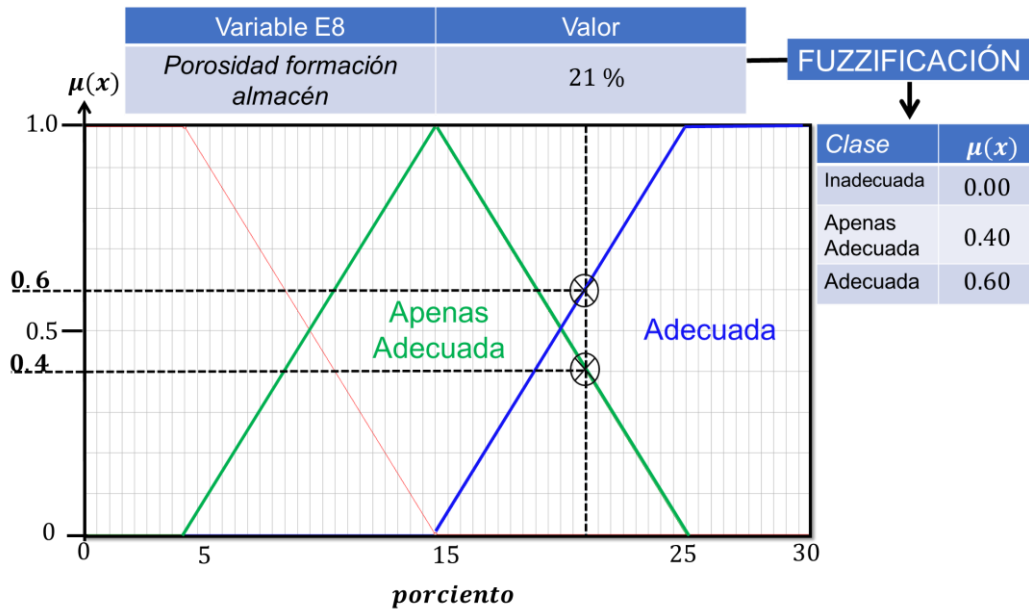


Figura III. 90. Fuzzificación de la variable *Porosidad* representativa de la formación almacén (21 %).

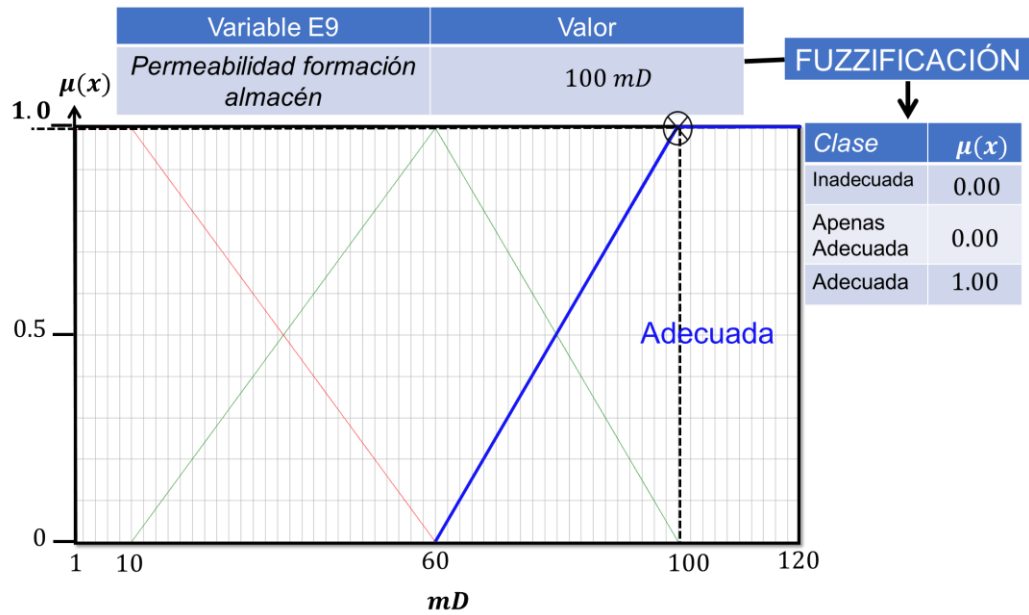


Figura III. 91. Fuzzificación de la variable *Permeabilidad* representativa de la formación almacén (100 mD).

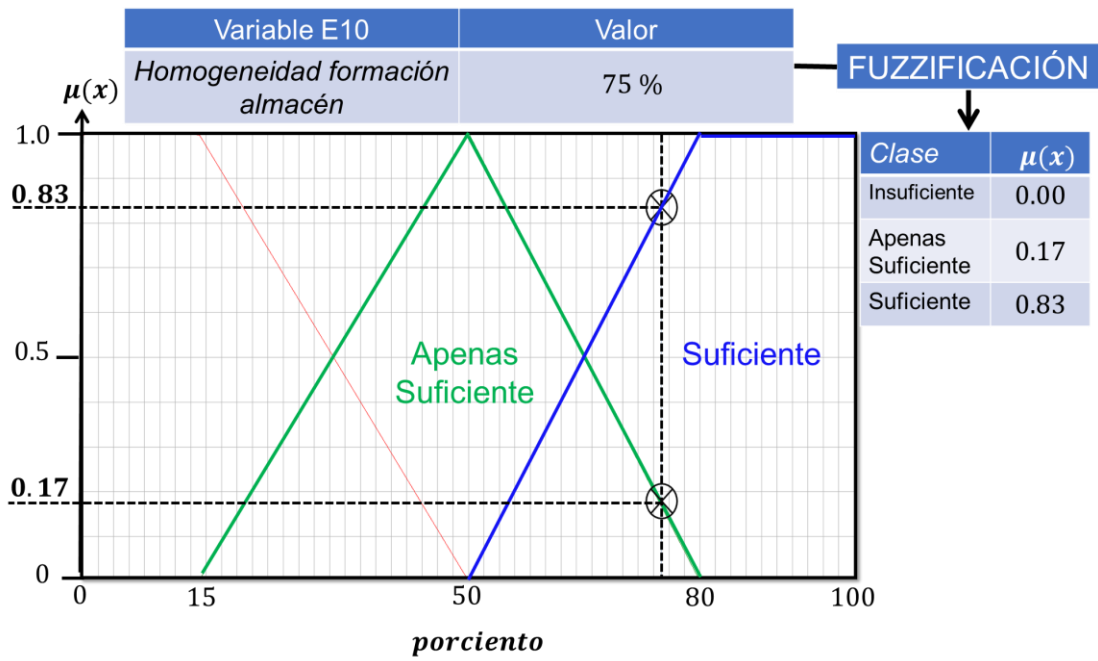


Figura III. 92. Fuzzificación de la variable *Homogeneidad de la formación almacén* (75 %).

SS2 Calidad de la formación sello.

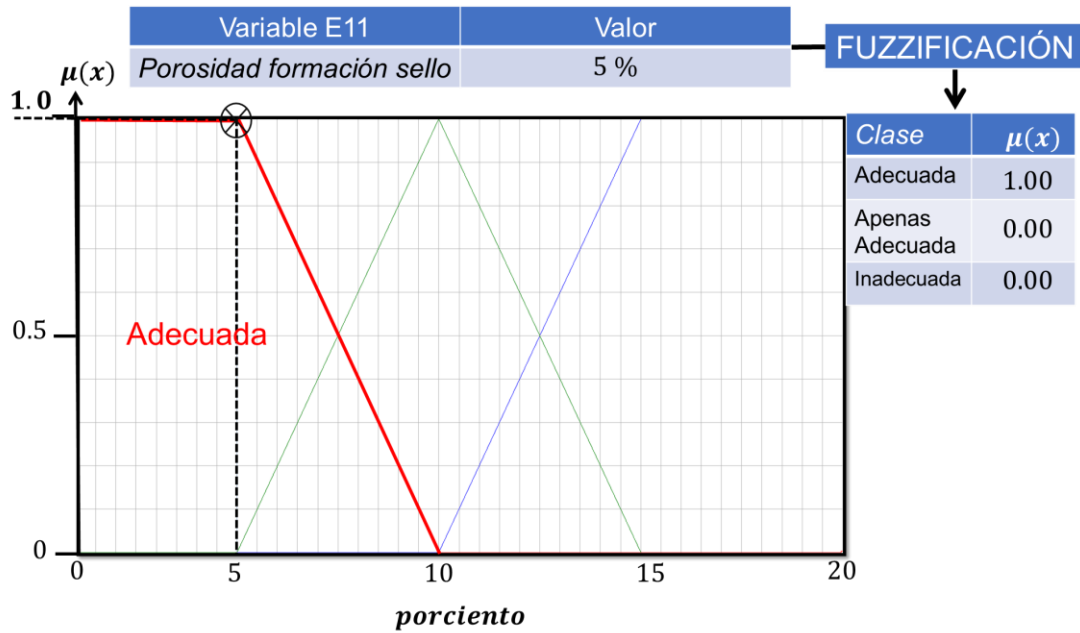


Figura III. 93. Fuzzificación de la variable *Porosidad representativa de la formación sello* (5 %).

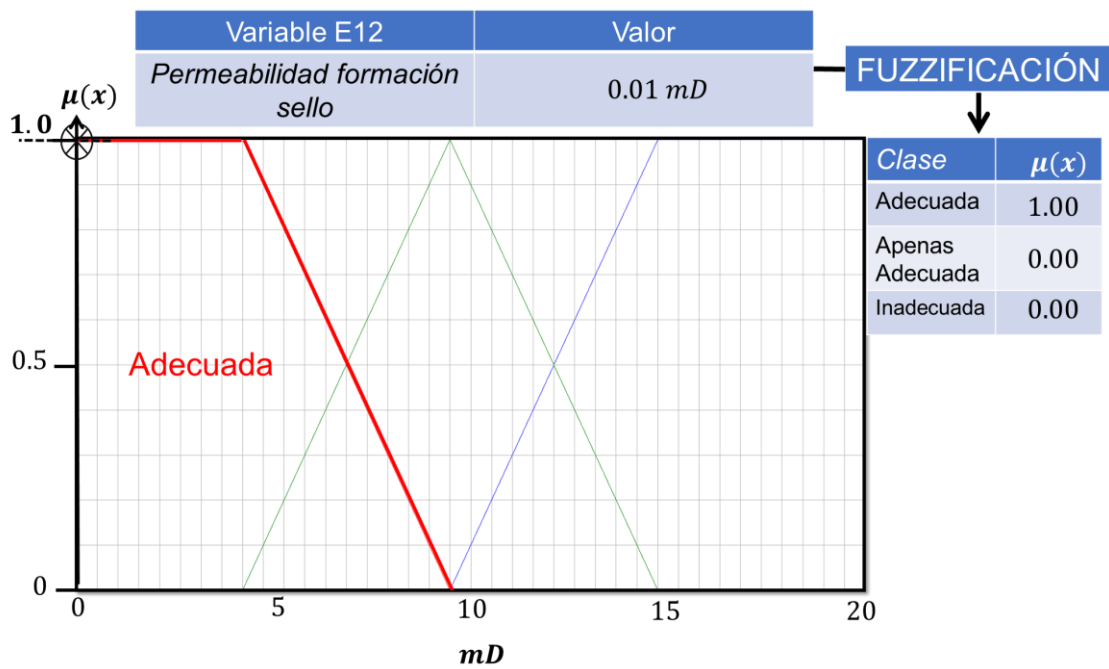


Figura III. 94. Fuzzificación de la variable *Permeabilidad representativa de la formación sello* (0.01 mD).

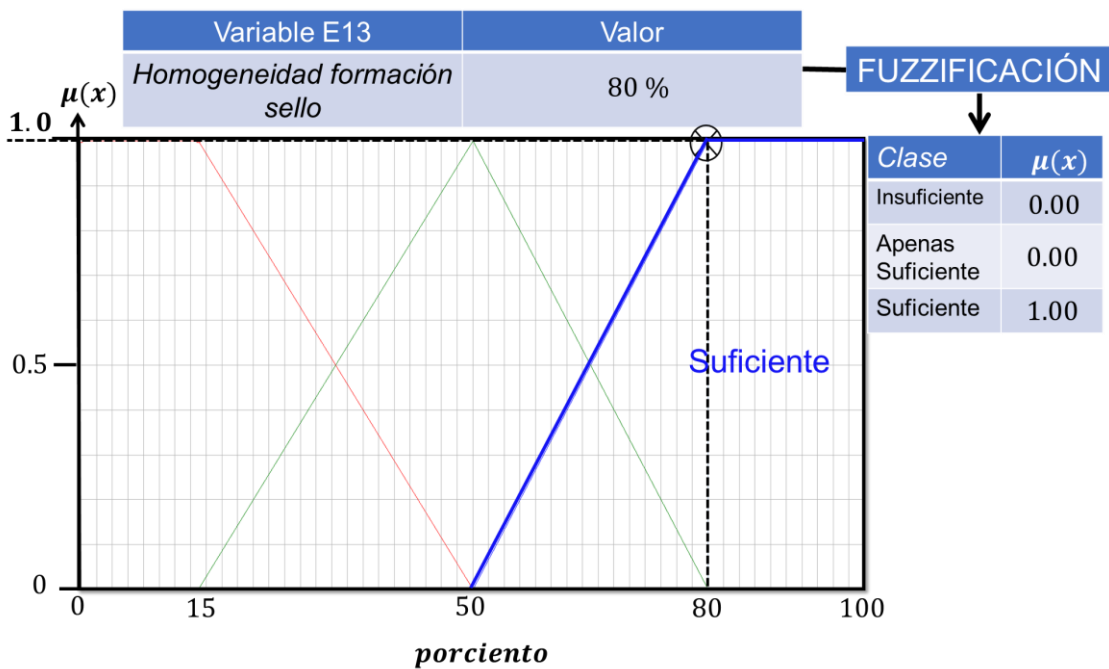


Figura III. 95. Fuzzificación de la variable *Homogeneidad de la formación sello* (80 %).

SS3 Configuración geométrica de las formaciones

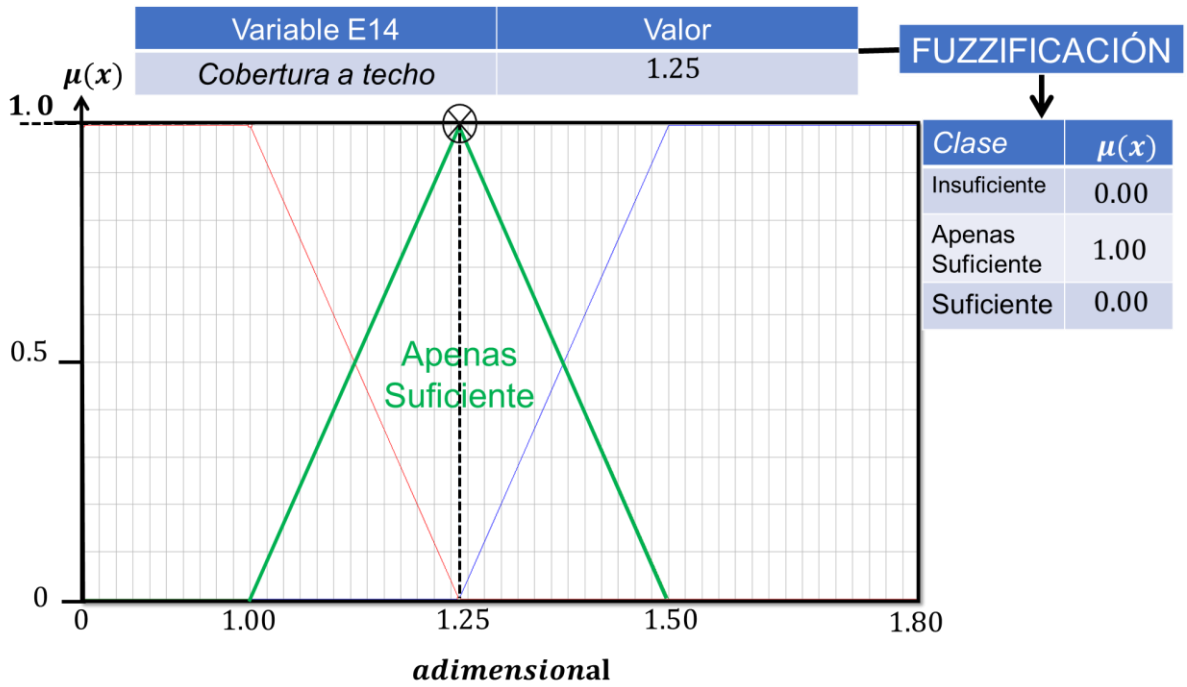


Figura III. 96. Fuzzificación de la variable Cobertura a techo (1.25).

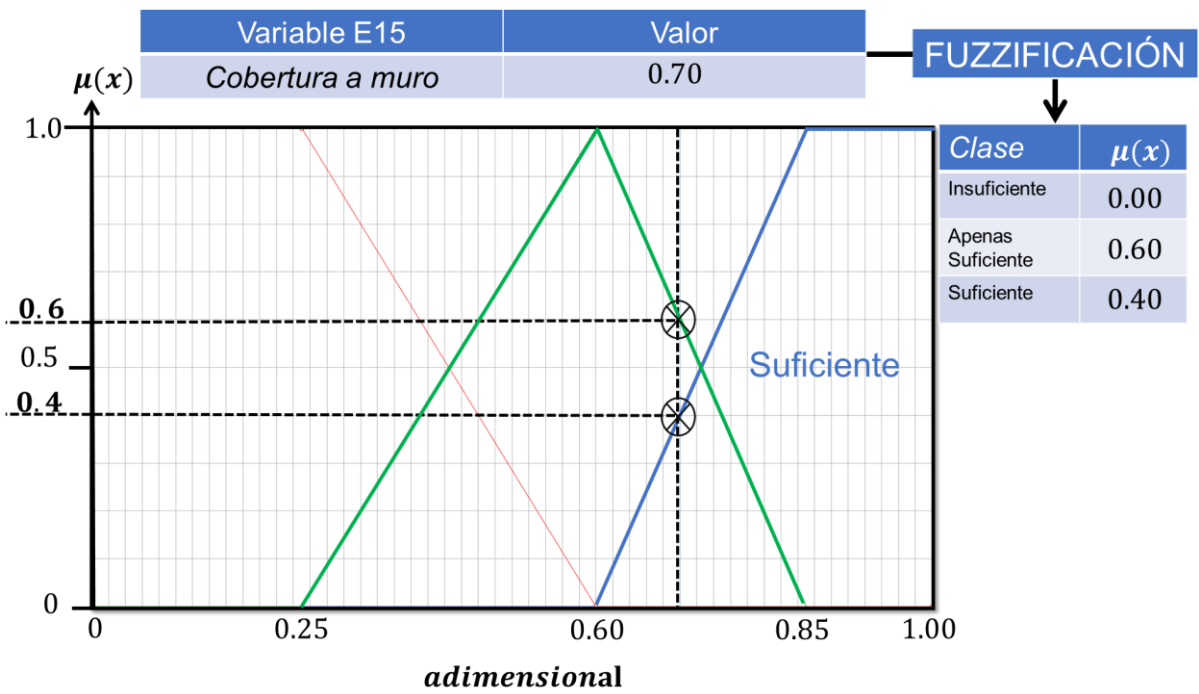


Figura III. 97. Fuzzificación de la variable Cobertura a muro (0.70).

Variable 5: Estado de la Emisión

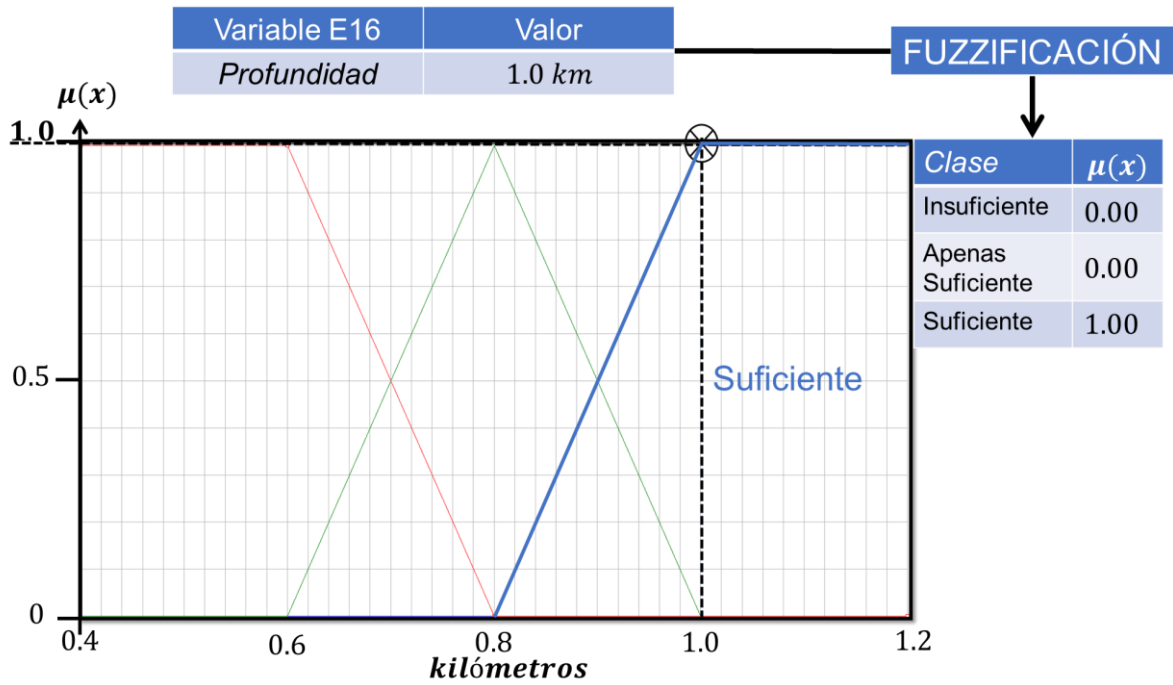


Figura III. 98. Fuzzificación de la variable Profundidad (1 kilómetro).

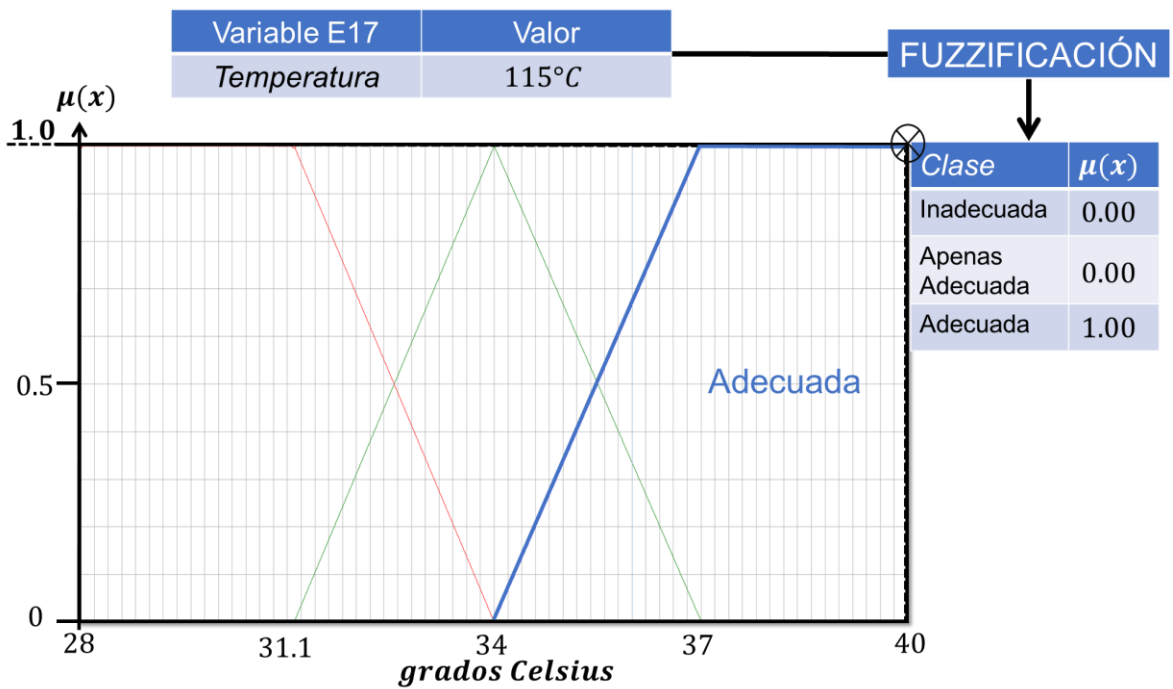


Figura III. 99. Fuzzificación de la variable Temperatura (115 °C).

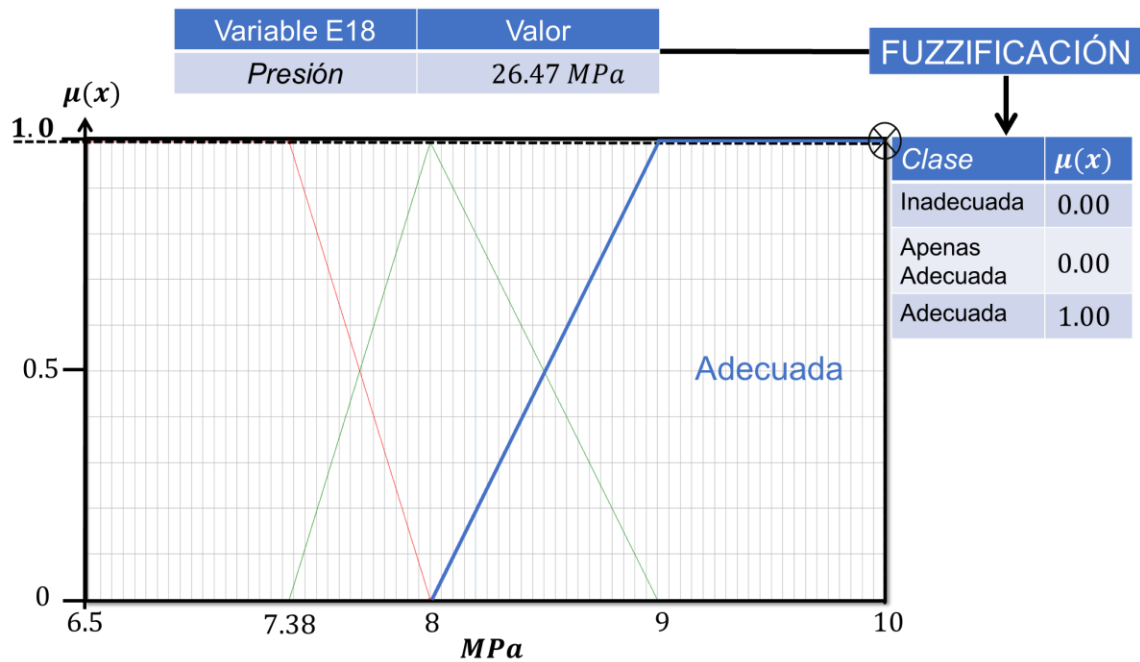


Figura III. 100. Fuzzificación de la variable *Presión* (26.47 MPa).

Variable 6: *Régimen hidrodinámico*

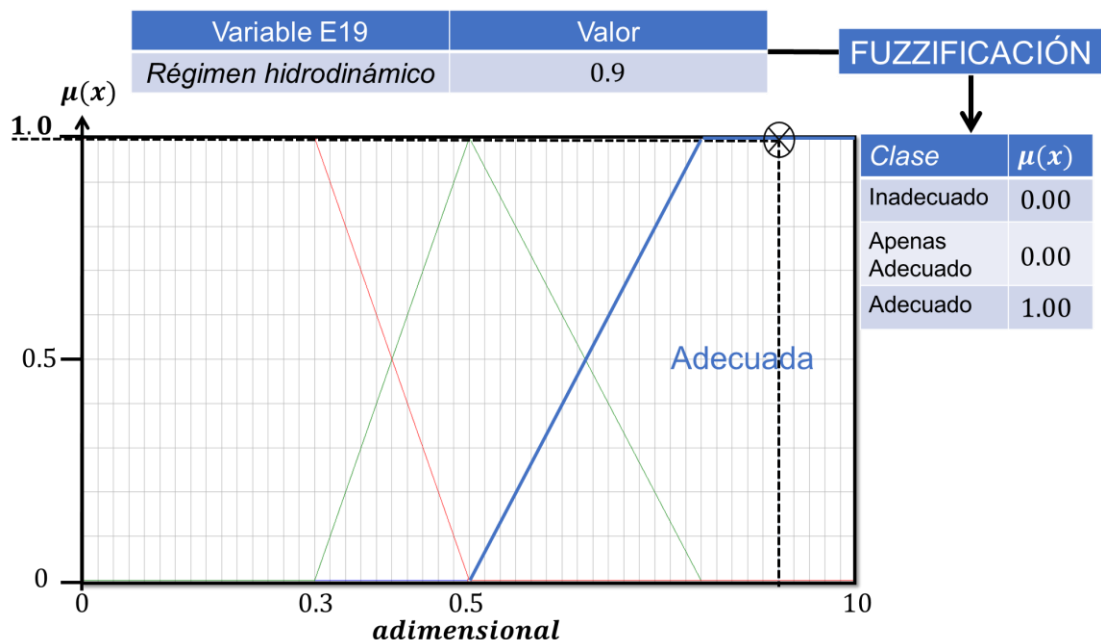


Figura III. 101. Fuzzificación de la variable *Régimen hidrodinámico* (0.9).

Como paso seguido será necesario evaluar las reglas SI...ENTONCES..., que con base en los conjuntos difusos obtenidos de la fuzzificación resultaron activadas. Así se obtiene el grado de pertenencia del consecuente (conjunto difuso de salida) de cada regla. Para este sistema se considera el operador AND de Zadeh para realizar la evaluación de las reglas.

Al obtener el grado de pertenencia del consecuente se debe determinar el DoV (Degree of Validity) que es el producto del DoS (Degree of Support) [0-1] (DoS: grado con el cual el sistema soporta una regla) por el grado de pertenencia del consecuente. (Nota: de tener varias reglas activadas con un mismo consecuente, se deberá tomar como único valor el de aquella regla que arroje el DoV más alto)

Evaluadas las reglas y obtenidos los DoV se ejecuta la agregación que permitirá obtener la salida difusa.

Con la salida difusa se realiza el proceso de defuzzificación aplicando el método del centroide

Este análisis se aplica para los sub sistemas en primera instancia y posteriormente para el sistema difuso global.

Variable 1: Estado de la Emisión

Para la primera variable se presenta como ejemplo de regla activada la número 54 (**Figura III. 102**).

Es importante mencionar que la regla 54 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Extremo* de la variable lingüística *Estado de la Emisión*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 103**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 104**). Finalmente, la salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide. Por tanto, se concluye que el Estado de la emisión de este complejo pertenece

- 0.35 al conjunto Notable

- 0.65 al conjunto Extremo

Con un valor defuzzificado de 74.63 % en la base de la variable *Estado de la Emisión*, lo cual indica que, existe una emisión importante cuyos efectos son importantes en la región.

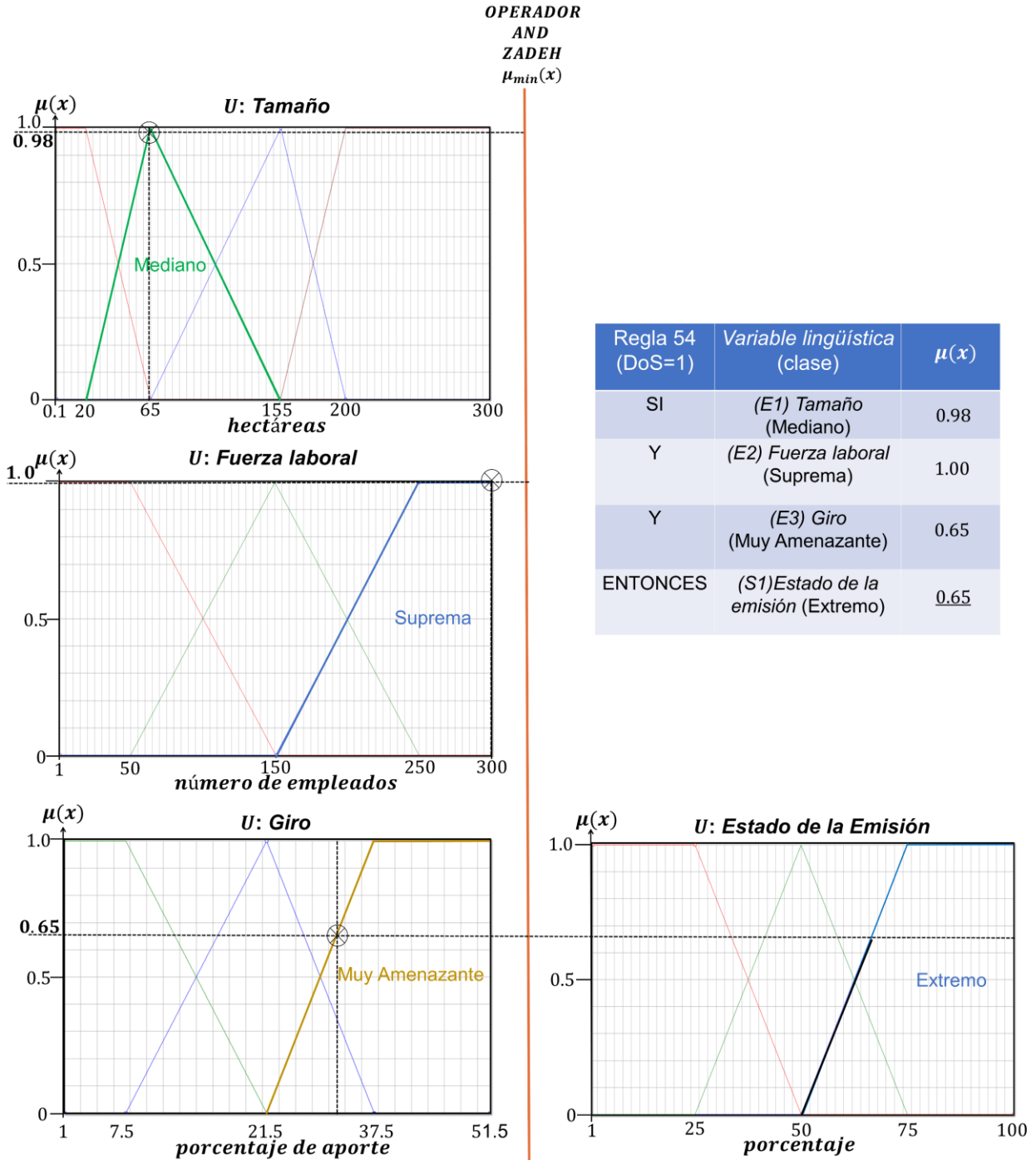


Figura III. 102. Proceso de análisis de la regla 54 para calificar al *Estado de la Emisión*.

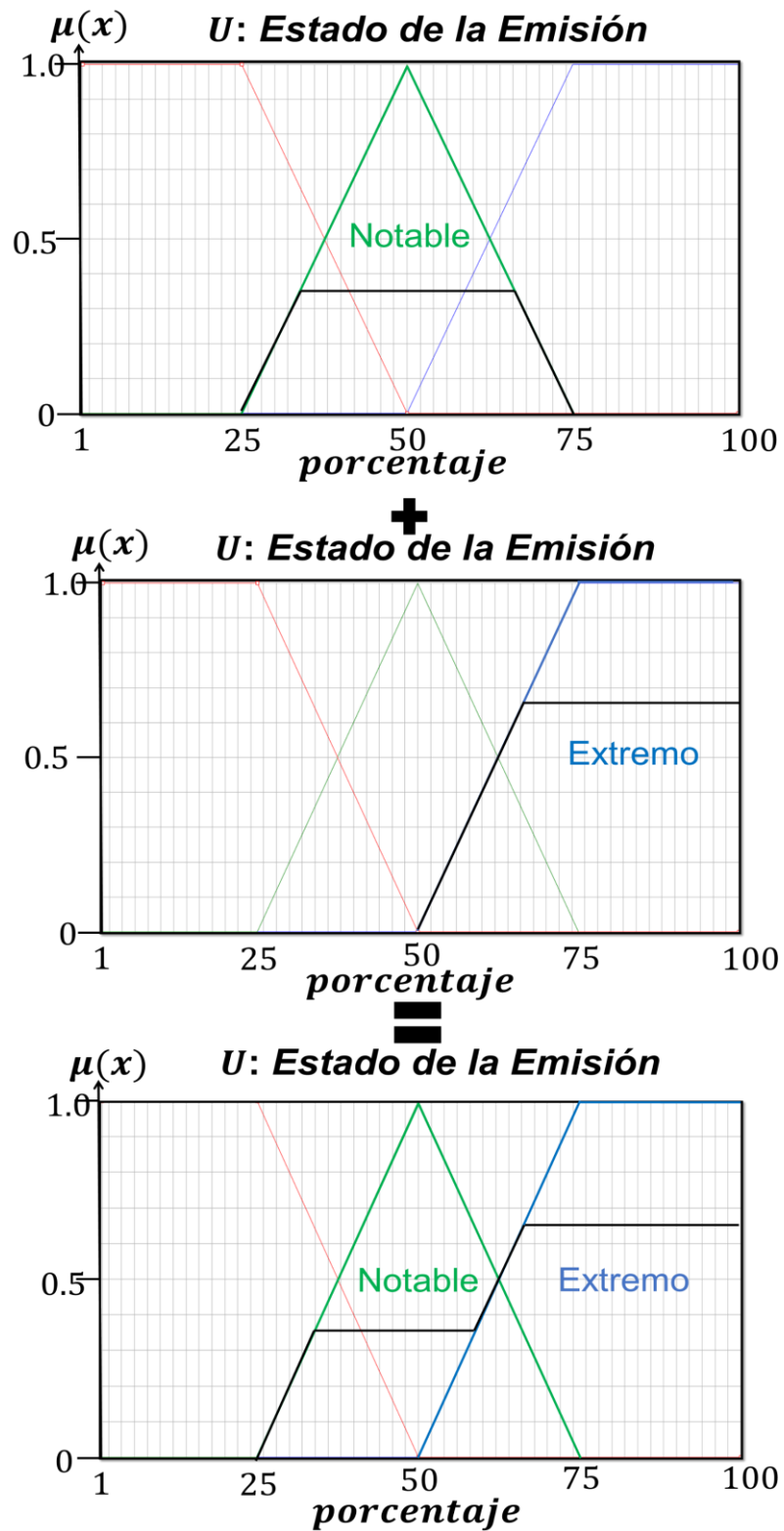


Figura III. 103. Proceso de agregación que permite calificar al Estado de la Emisión.

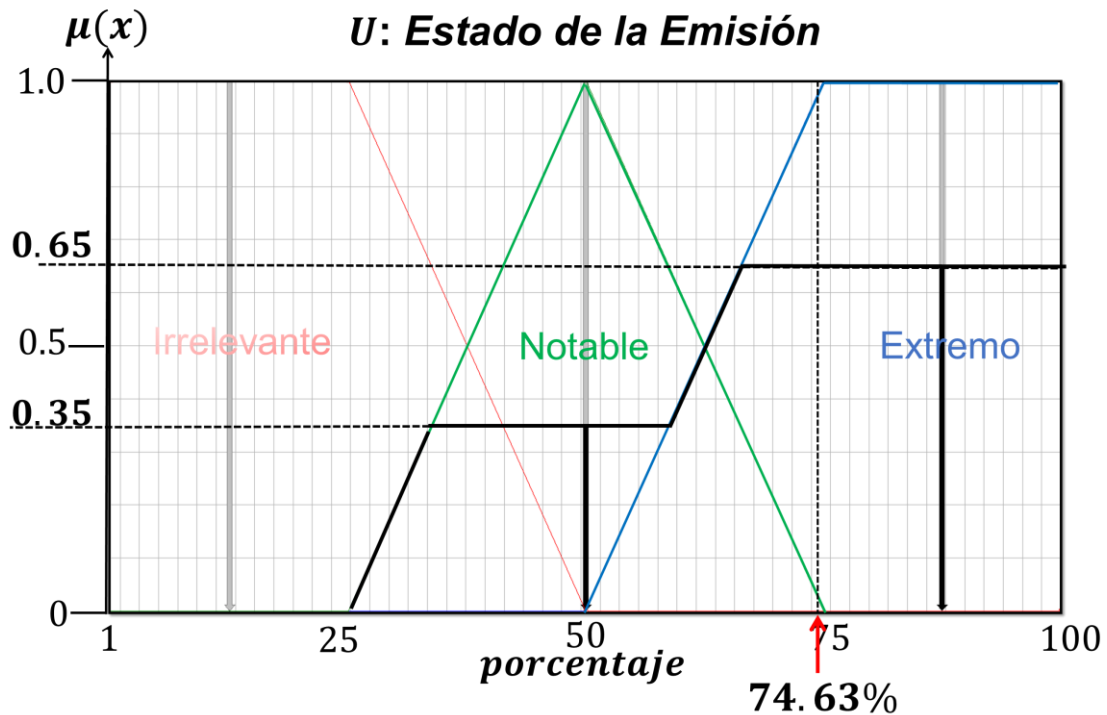


Figura III. 104. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Estado de la Emisión*.

Variable 2: Disponibilidad

Para la segunda variable se presenta como ejemplo de regla activada la número 32 (**Figura III. 105**).

Es importante mencionar que la regla 32 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Moderada* de la variable lingüística *Disponibilidad*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 106**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 107**). Finalmente, la salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide. Por tanto, se concluye que la *Disponibilidad de infraestructura* para el transporte pertenece:

- 0.40 al conjunto Mínima
- 0.65 al conjunto Moderada

Con un valor defuzzificado de 31 % en la base de la variable *Disponibilidad*, que indica la presencia de infraestructura que puede adecuarse para el transporte sin embargo aún se requerirá de un mayor número de instalaciones

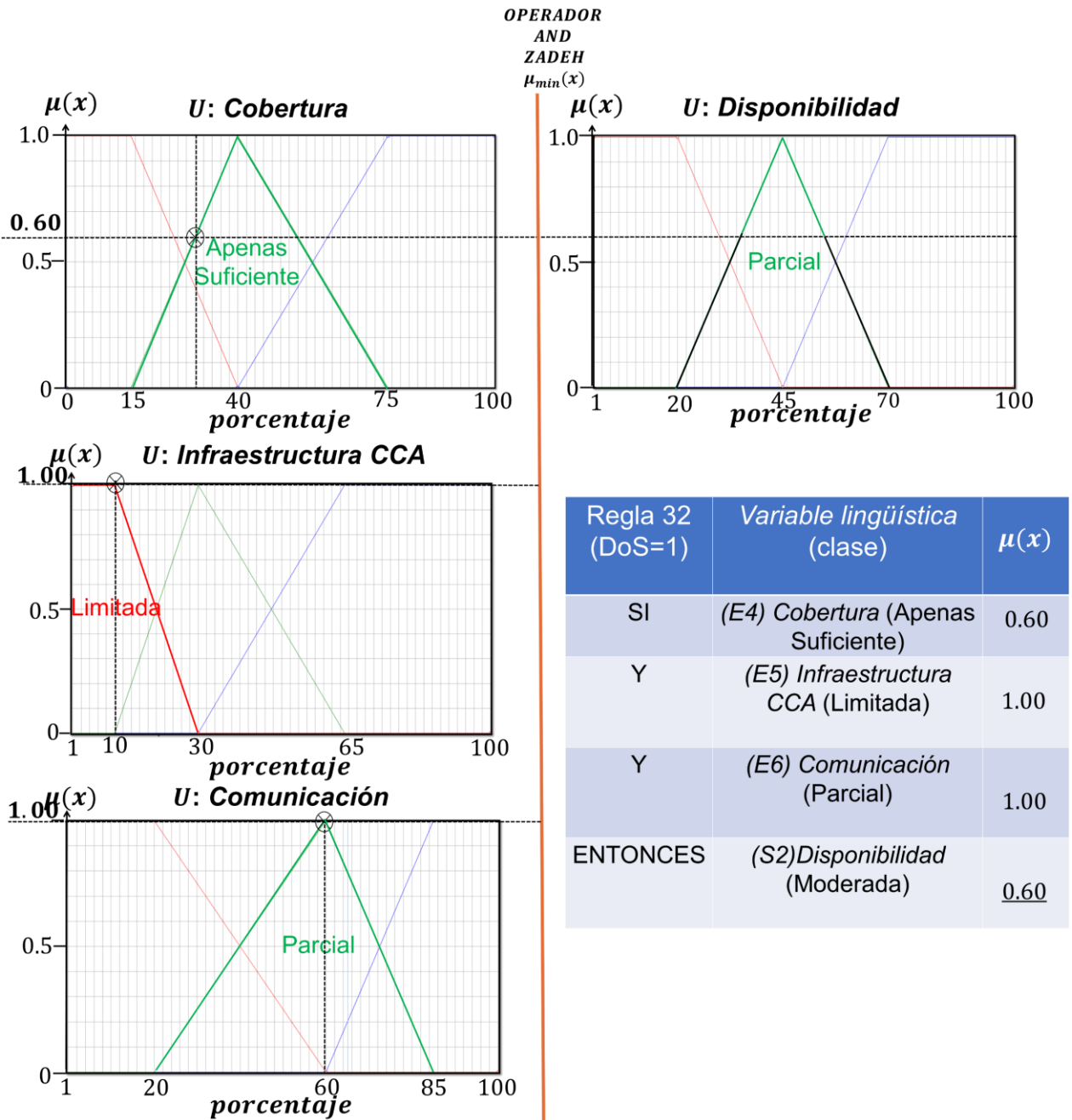


Figura III. 105. Proceso de análisis de la regla 32 para calificar la *Disponibilidad*.

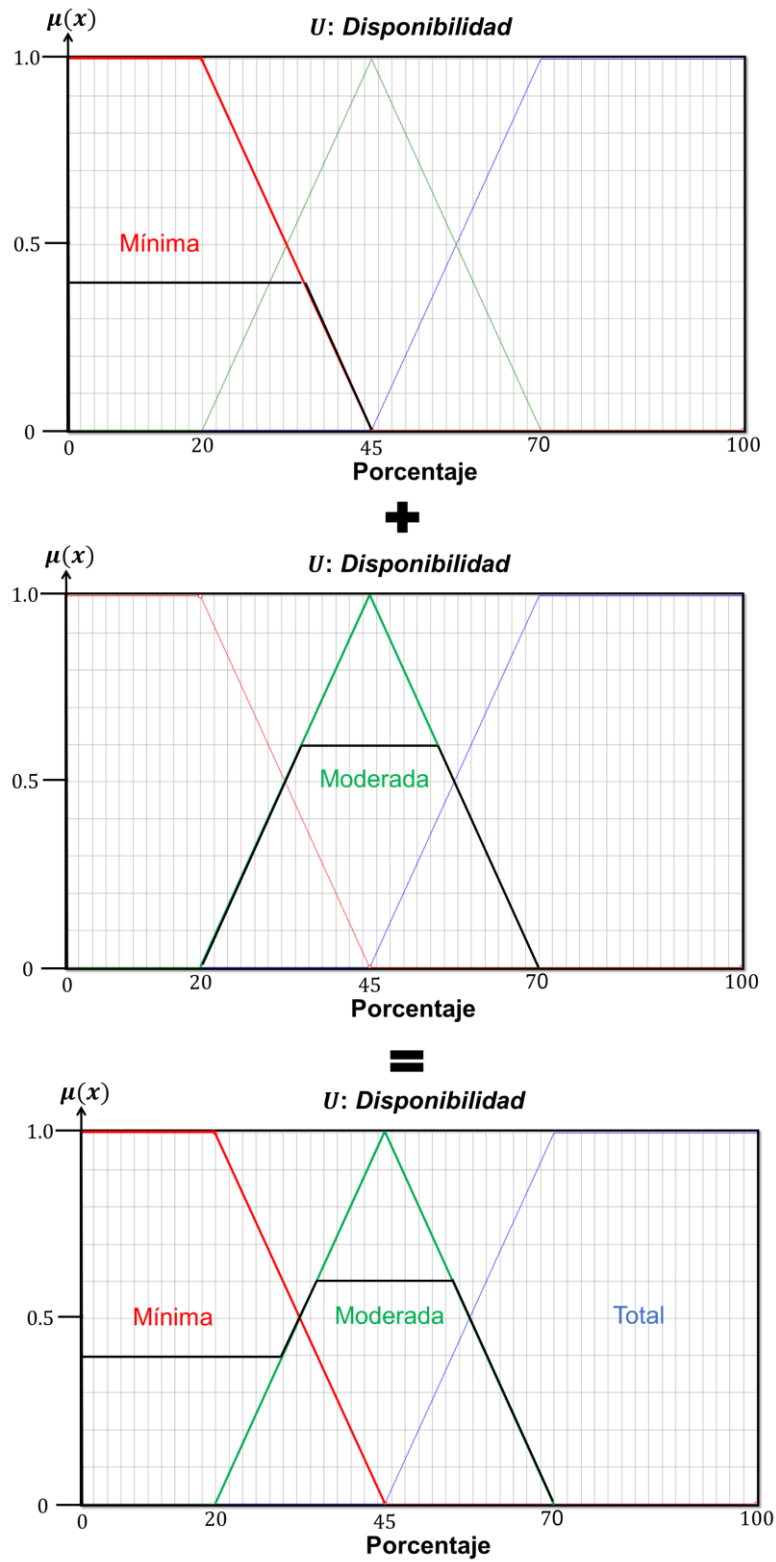


Figura III. 106. Proceso de agregación que permite calificar la Disponibilidad.

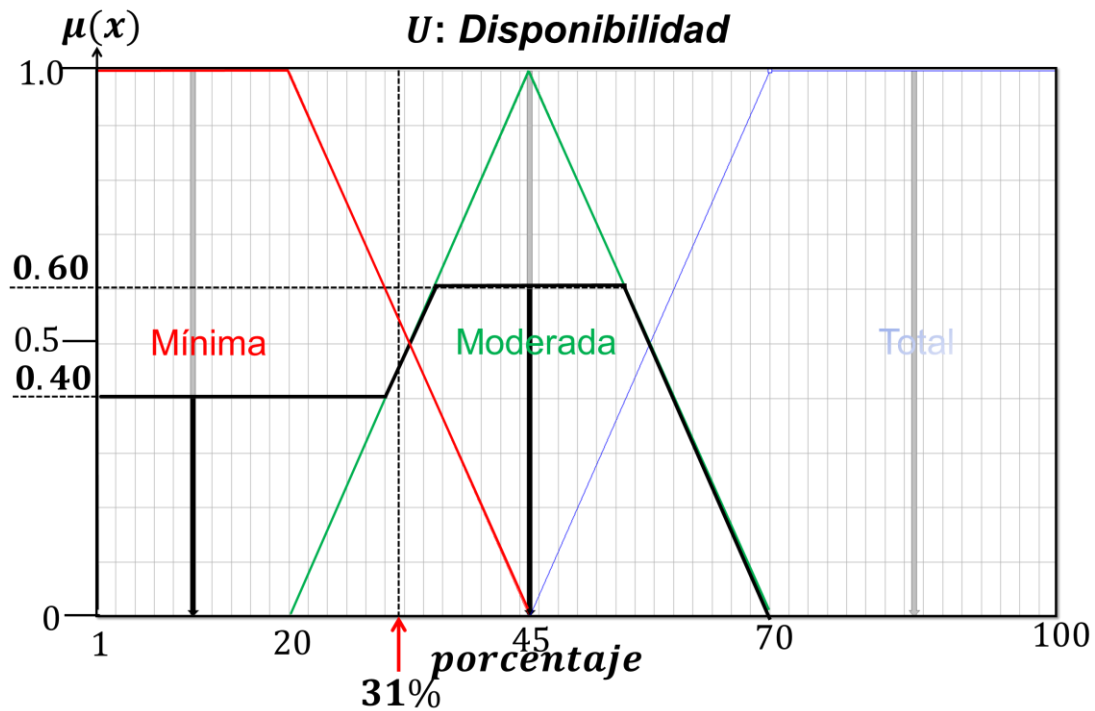


Figura III. 107. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Disponibilidad*.

Variable 4: *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello.*

SS1 Calidad de la formación almacén.

La cuarta variables se compone por una serie de sub sistemas anidados, el primero califica la *Calidad de la formación almacén*, como ejemplo de regla activada se muestra número 81 (**Figura III. 108**).

Es importante mencionar que la regla 81 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Muy Buena de la variable lingüística *Calidad de la formación almacén*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 109**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 110**). La salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide.

Se concluye que la *Calidad de la formación almacén* pertenece:

- 0.40 al conjunto Buena
- 0.60 al conjunto Muy Buena

Con un valor defuzzificado de 65.50% en la base de la variable *Calidad de la formación almacén*. Indica que las propiedades de la formación almacén son lo suficientes para almacenar el gas.

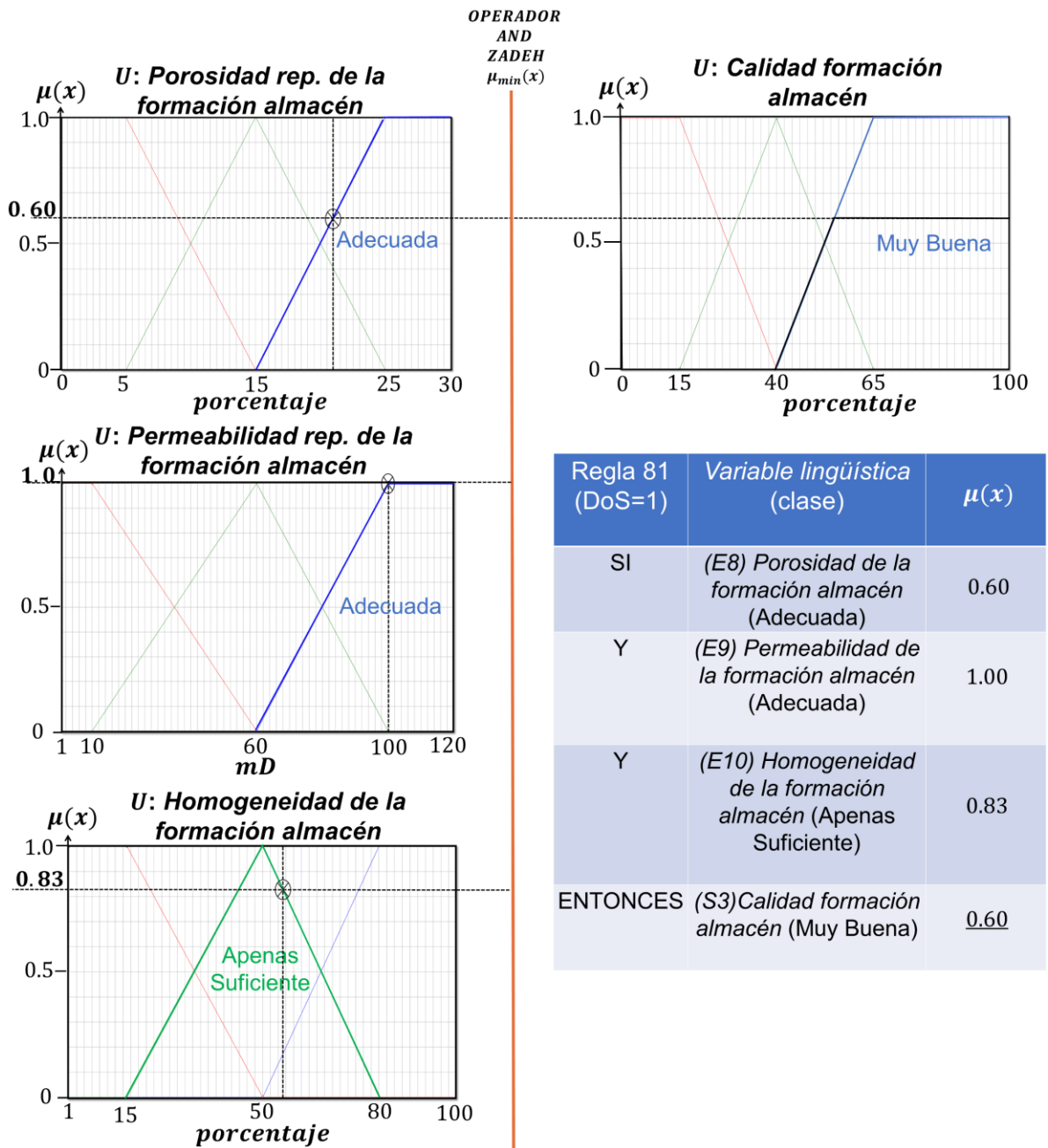


Figura III. 108. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar *Calidad de la formación almacén*.

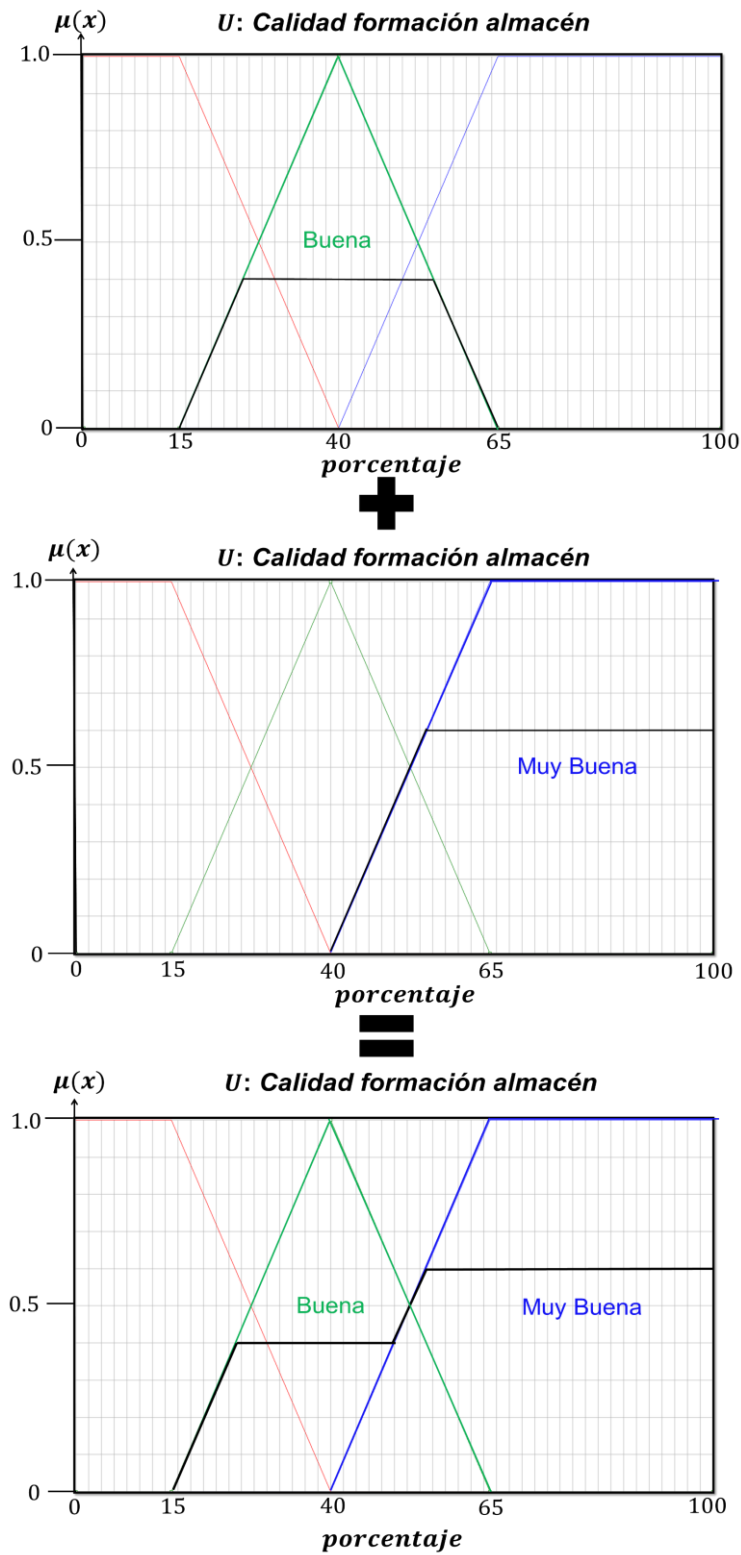


Figura III. 109. Proceso de agregación que permite calificar la *Calidad de la formación almacén*.

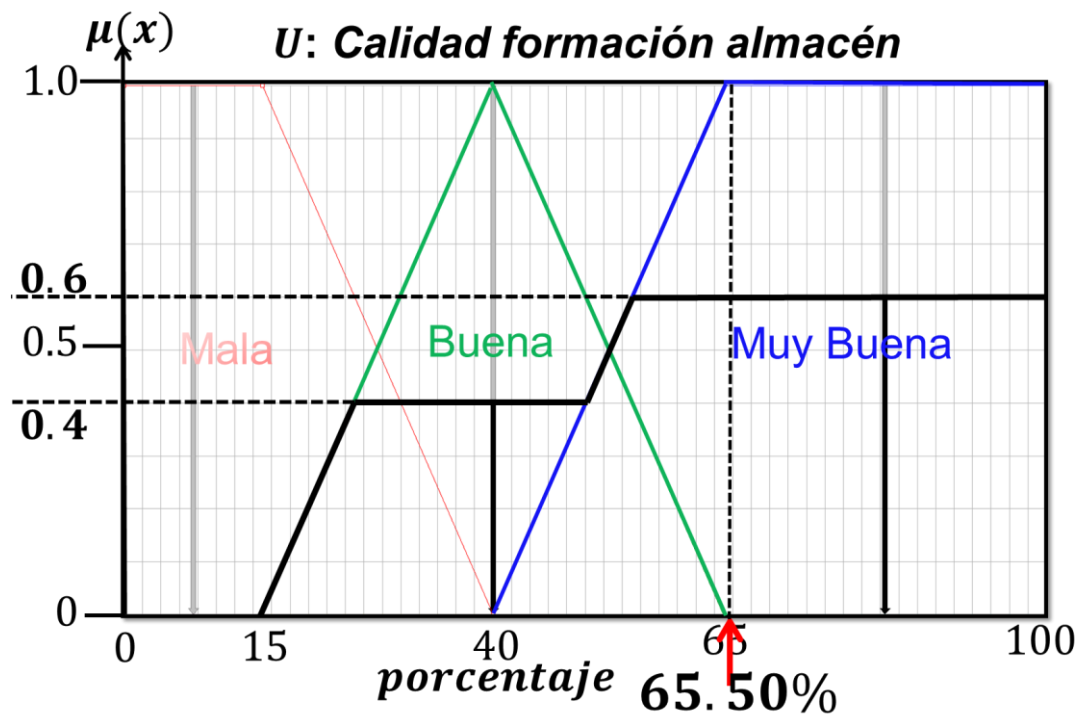


Figura III. 110. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Calidad de la formación almacén*.

SS2 Calidad de la formación sello.

El segundo sub sistema anidado califica la *Calidad de la formación sello*, como ejemplo de regla activada se muestra número 9 (**Figura III. 111**).

Es importante mencionar que la regla 9 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Muy Buena* de la variable lingüística *Calidad de la formación sello*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 112**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 113**). La salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide. Se concluye que la *Calidad de la formación sello* pertenece:

- 1.00 al conjunto *Muy Buena*

Con un valor defuzzificado de 87.50% en la base de la variable *Calidad de la formación sello*. Indica que la formación sello funge como una barrera impermeable efectiva.

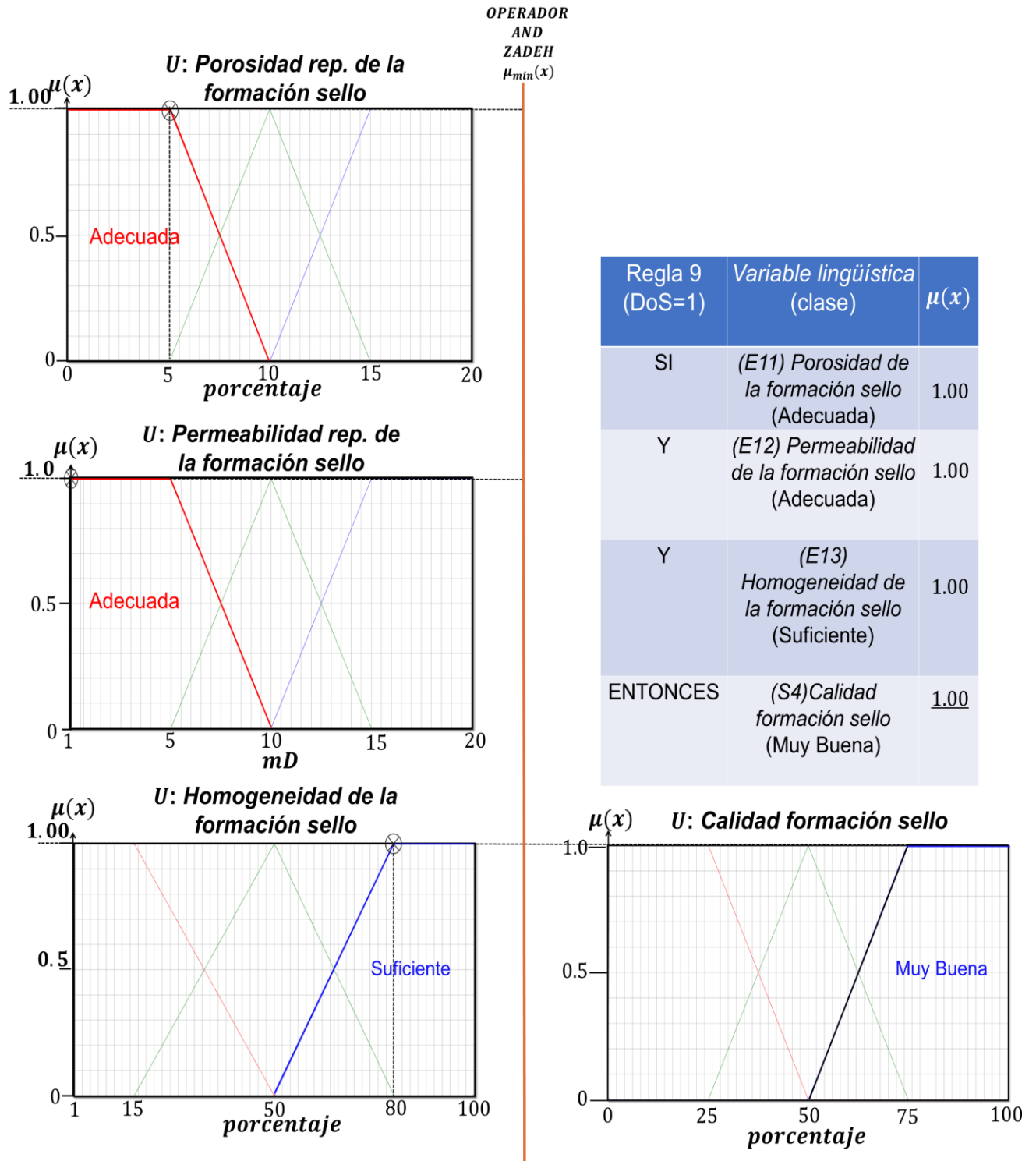


Figura III. 111. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar *Calidad de la formación sello*.

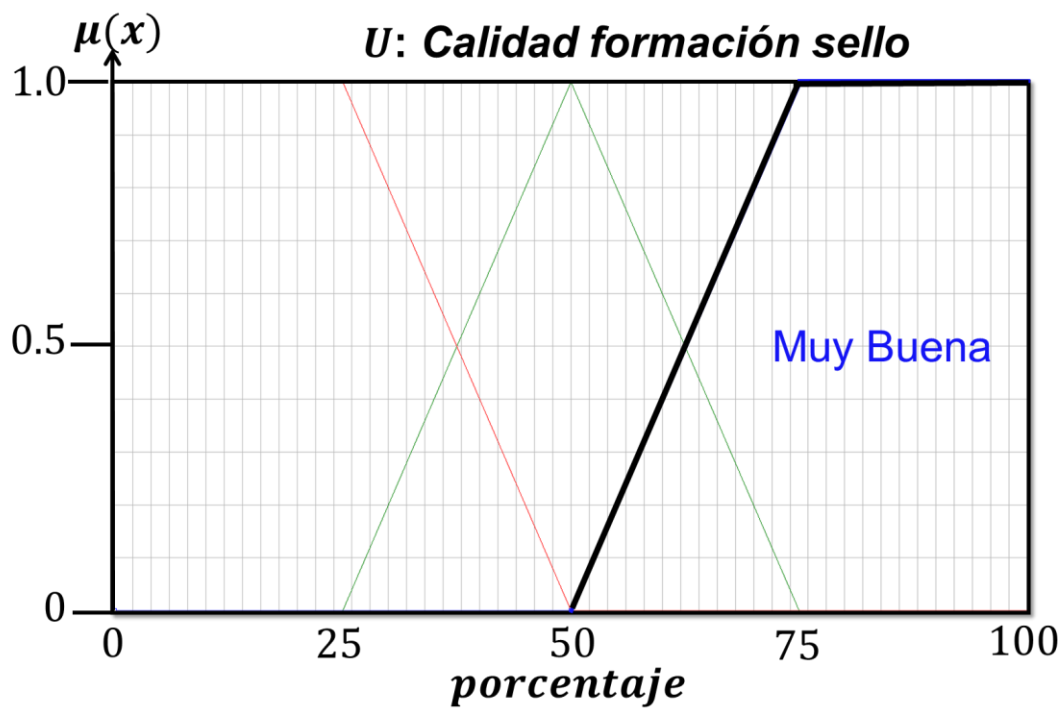
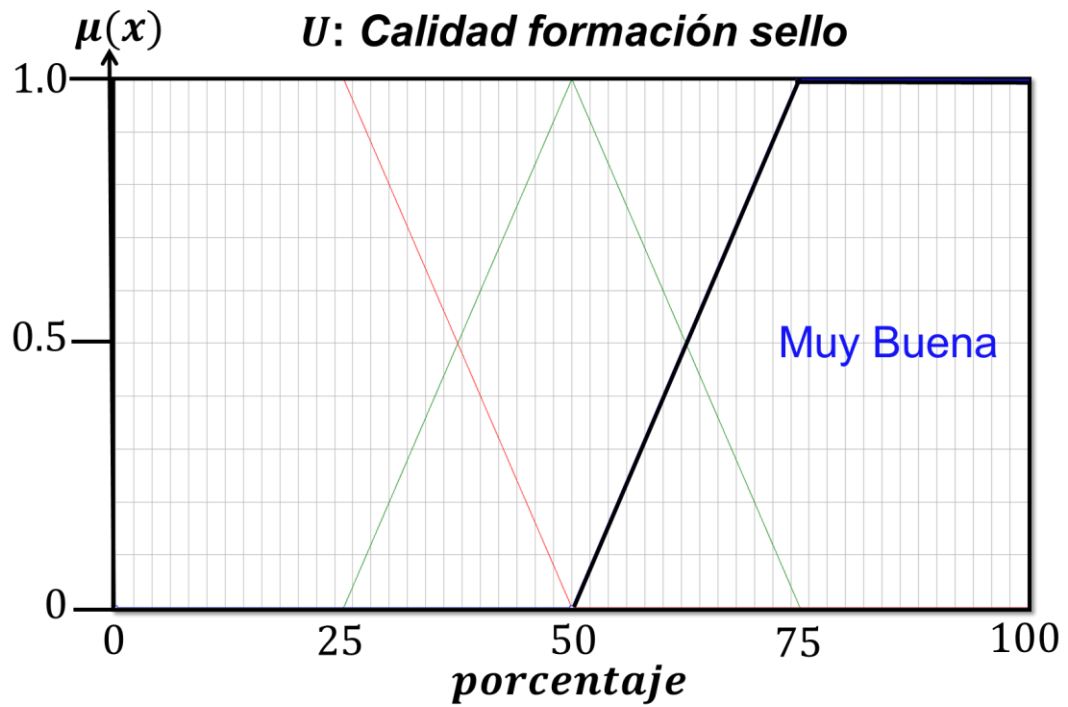


Figura III. 112. Proceso de agregación que permite calificar la *Calidad de la formación sello*.

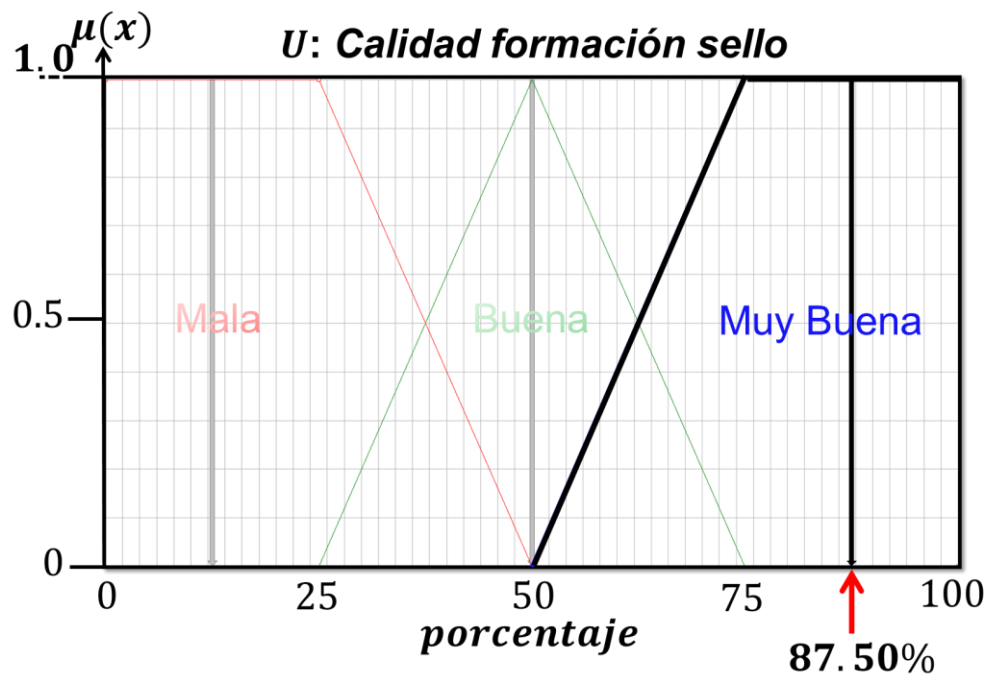


Figura III. 113. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Calidad de la formación almacén*.

SS3 Configuración geométrica de las formaciones.

El tercer sub sistema anidado califica la *Calidad de la formación sello*, como ejemplo de regla activada se muestra número 14 (**Figura III. 114**). Es importante mencionar que la regla 14 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Efectiva de la variable lingüística *Configuración geométrica de las formaciones*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 115**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 116**). Finalmente la salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide. Se concluye que la *Calidad de la formación sello* pertenece:

- 0.60 al conjunto Efectiva
- 0.40 al conjunto Muy Efectiva

Con un valor defuzzificado de 66% en la base de la variable *Calidad de la formación sello*, que indica que la formación almacén esta cubierta por una formación sello de tal forma que garantiza la casi nula existencia de fugas a techo sin embargo a muro existe la ausencia de formación sello en varias zonas, más no es un factor que impida el almacenamiento.

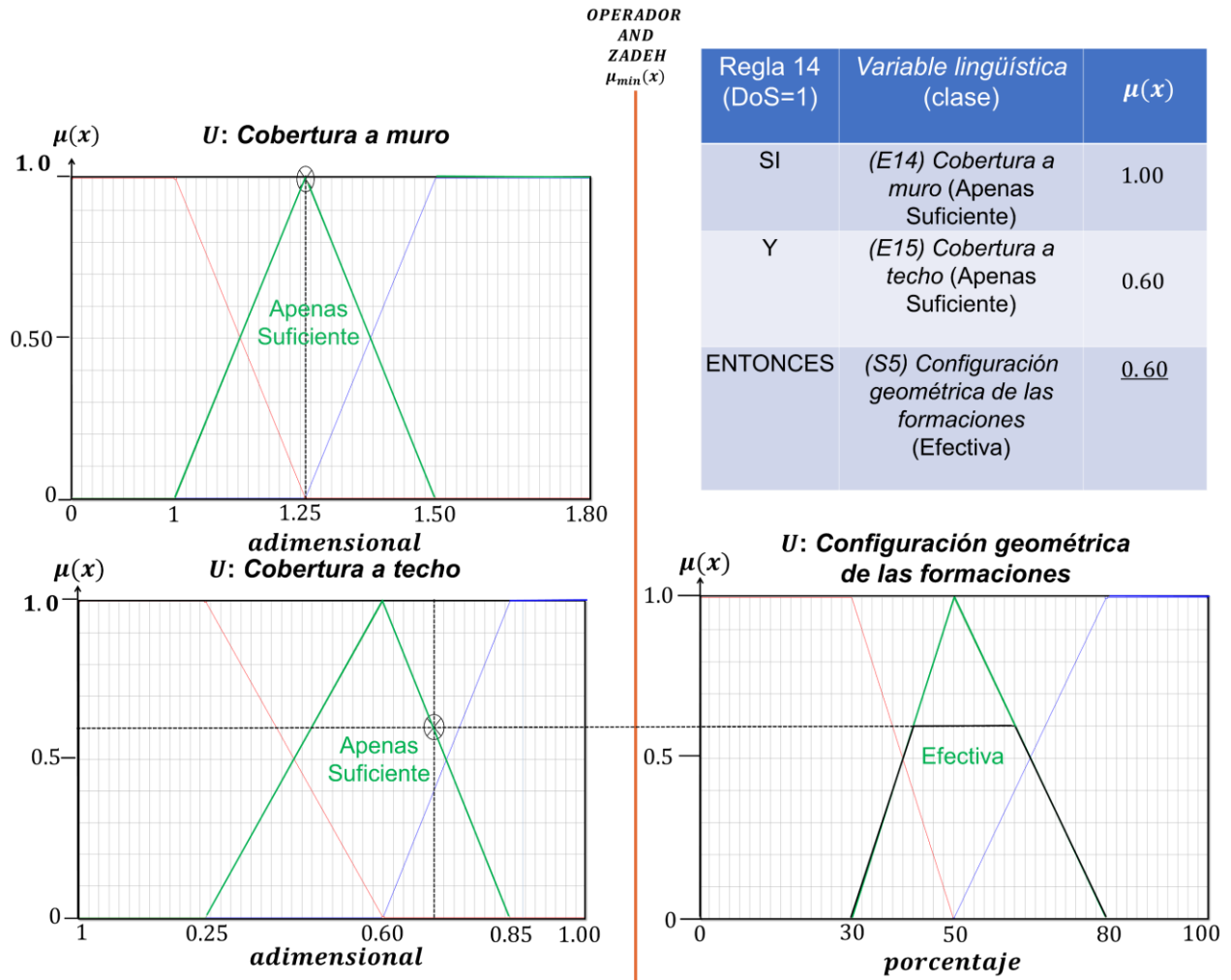


Figura III. 114. Proceso de análisis de la regla 14 para calificar *Configuración geométrica de las formaciones*.

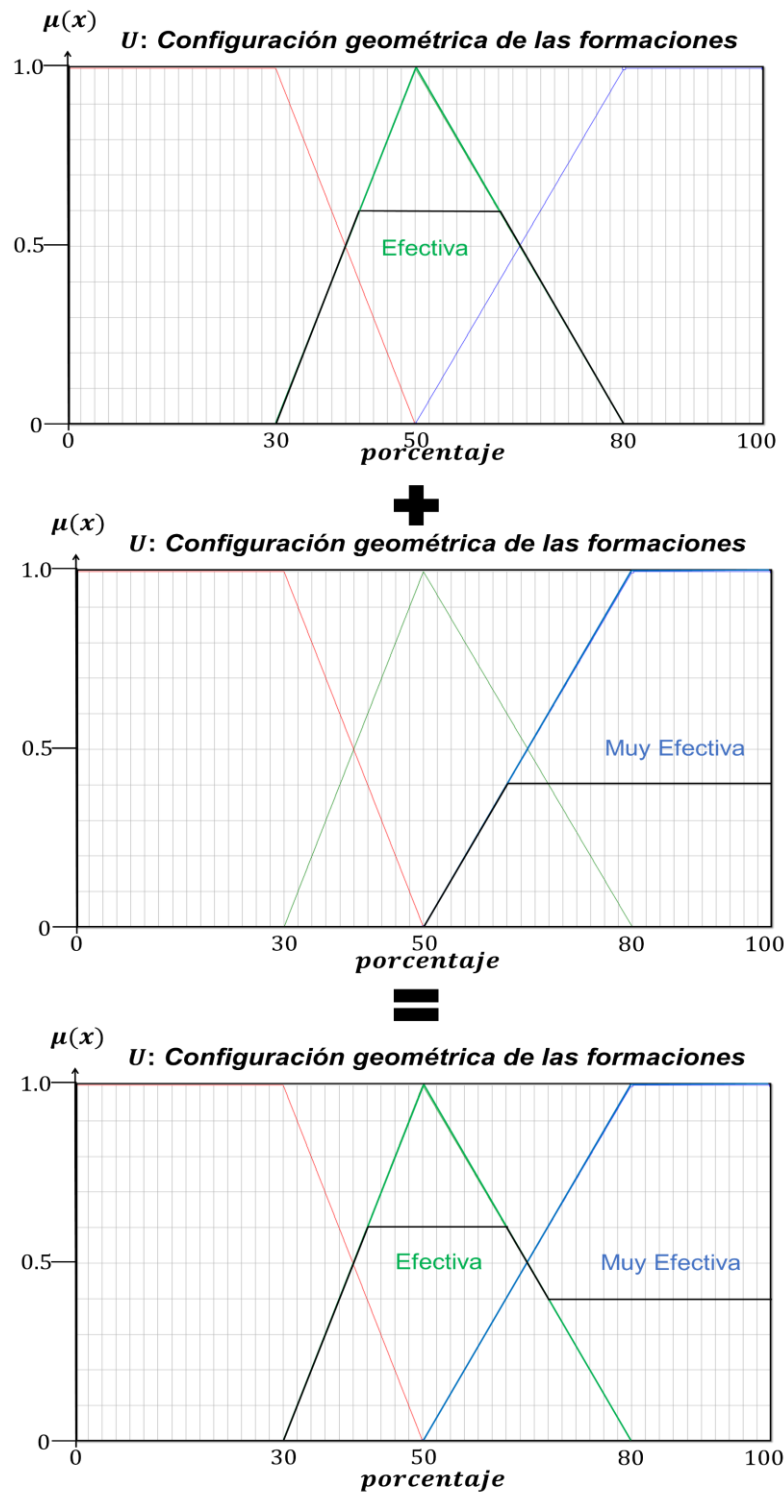


Figura III. 115. Proceso de agregación que permite calificar la *Configuración geométrica de las formaciones*.

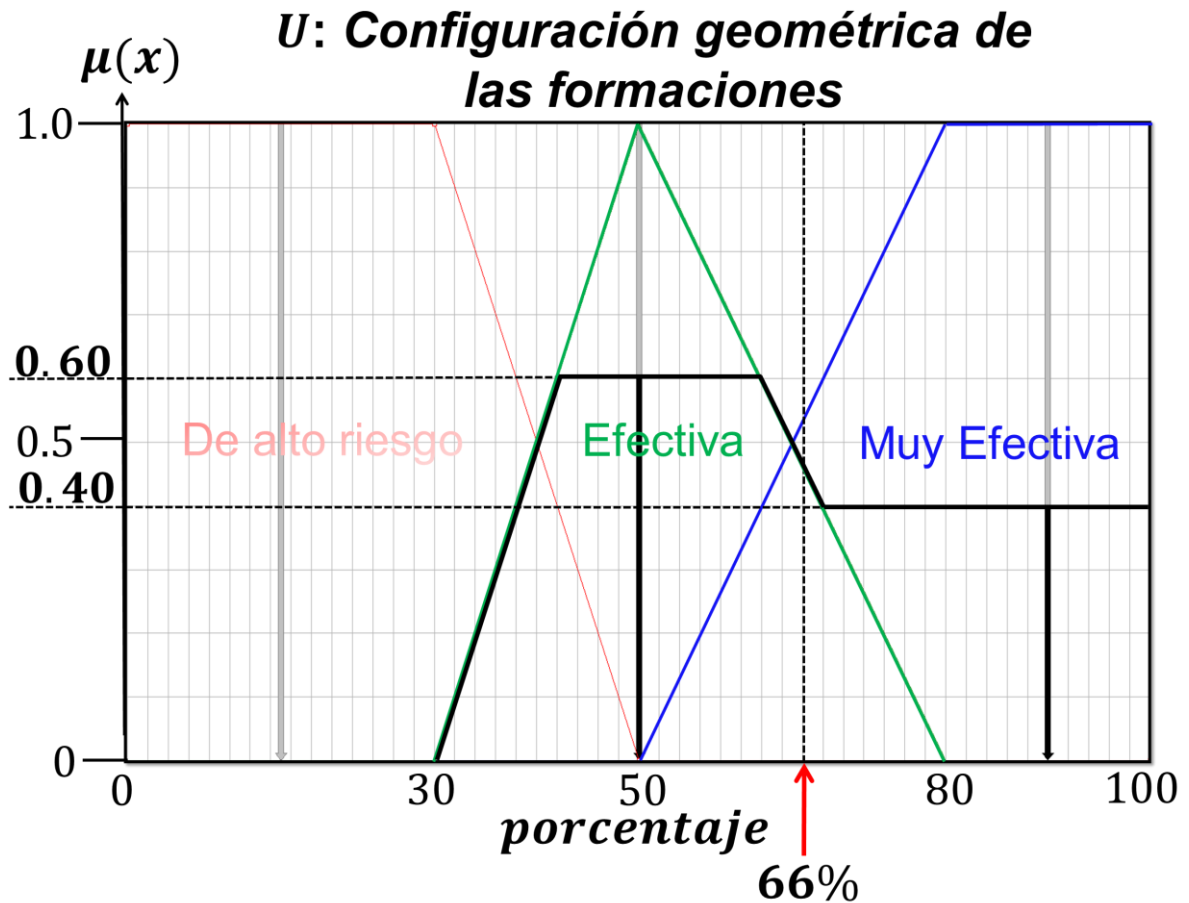


Figura III. 116. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Configuración geométrica de las formaciones*.

SS4 Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello.

Para calificar las *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*, se tomarán como variables de entrada (fuzzificadas) a las salidas (fuzzificadas) previamente obtenidas de la: *Calidad de la formación almacén*, *Calidad de la formación sello* y *Configuración geométrica de las formaciones*. Recordando, los resultados obtenidos se concentran en la **Tabla III. 12**.

Tabla III. 12. Información necesaria para calificar *Cualidades esp de las formaciones*.

Variable	Función de membresía (grado de membresía)
<i>Calidad de la formación almacén.</i>	Buena (0.4)
	Muy Buena (0.6)
<i>Calidad de la formación sello.</i>	Muy Buena (1.0)
<i>Configuración geométrica</i>	Efectiva (0.6)
	Muy Efectiva (0.4)

Con base en esta información se analizan las reglas activadas del sexto bloque de reglas del sistema difuso, como ejemplo se muestra la regla número 78 (**Figura III. 117**).

Es importante mencionar que la regla 78 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso Aptas de la variable lingüística *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 118**), con esta información se determina la salida difusa (**Figura III. 119**). Finalmente, la salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide. Se concluye que las *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello* pertenecen:

- 0.40 a Moderadamente aptas.
- 0.60 a Aptas.

Con un valor defuzzificado de 72.50% en la base de la variable *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*. Significa que el sitio tiene las condiciones necesarias para crear un buen almacén sin riesgo de fugas y posee las características para almacenar cantidades importantes de CO₂.

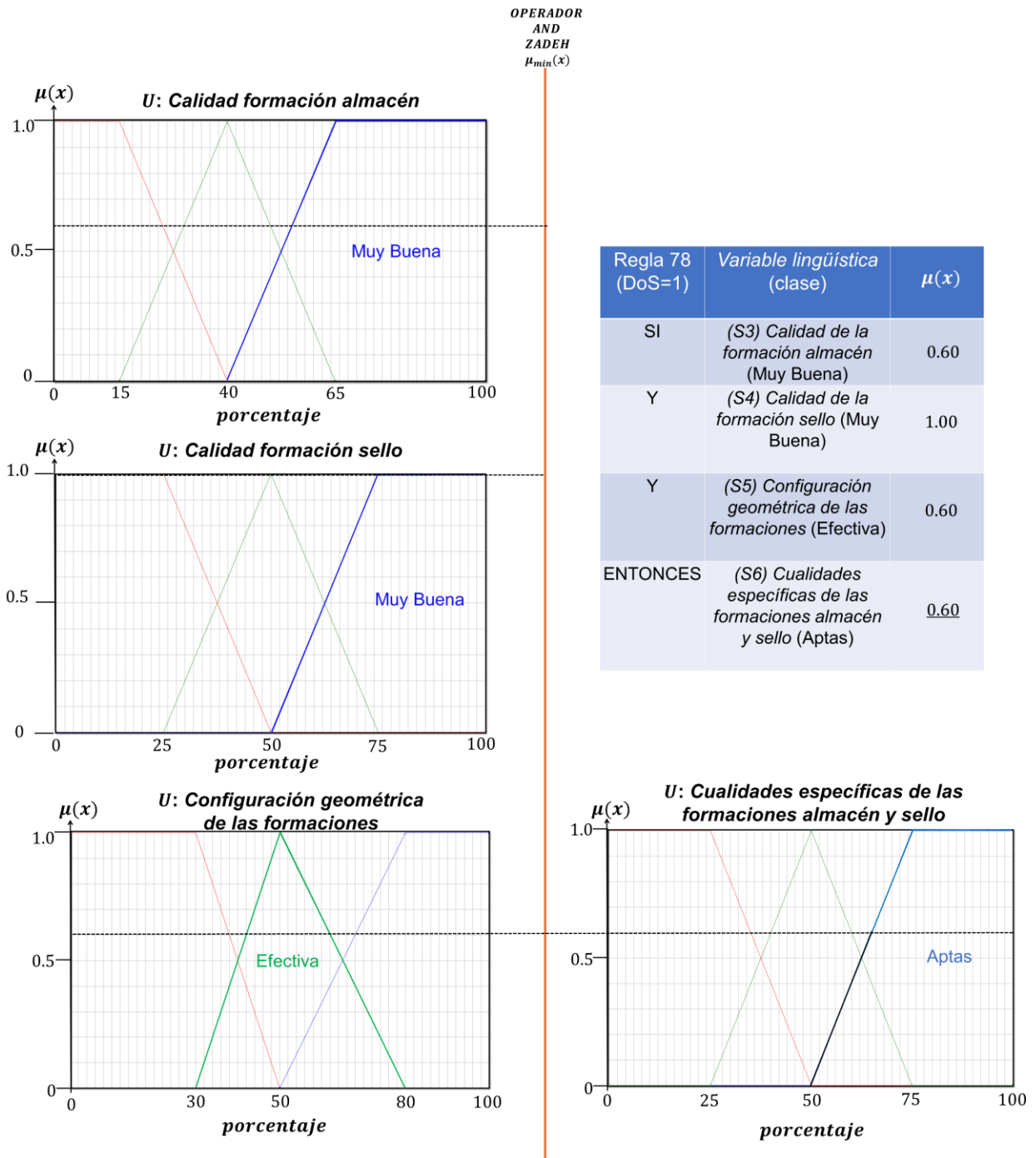


Figura III. 117. Proceso de análisis de la regla 78 para calificar *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

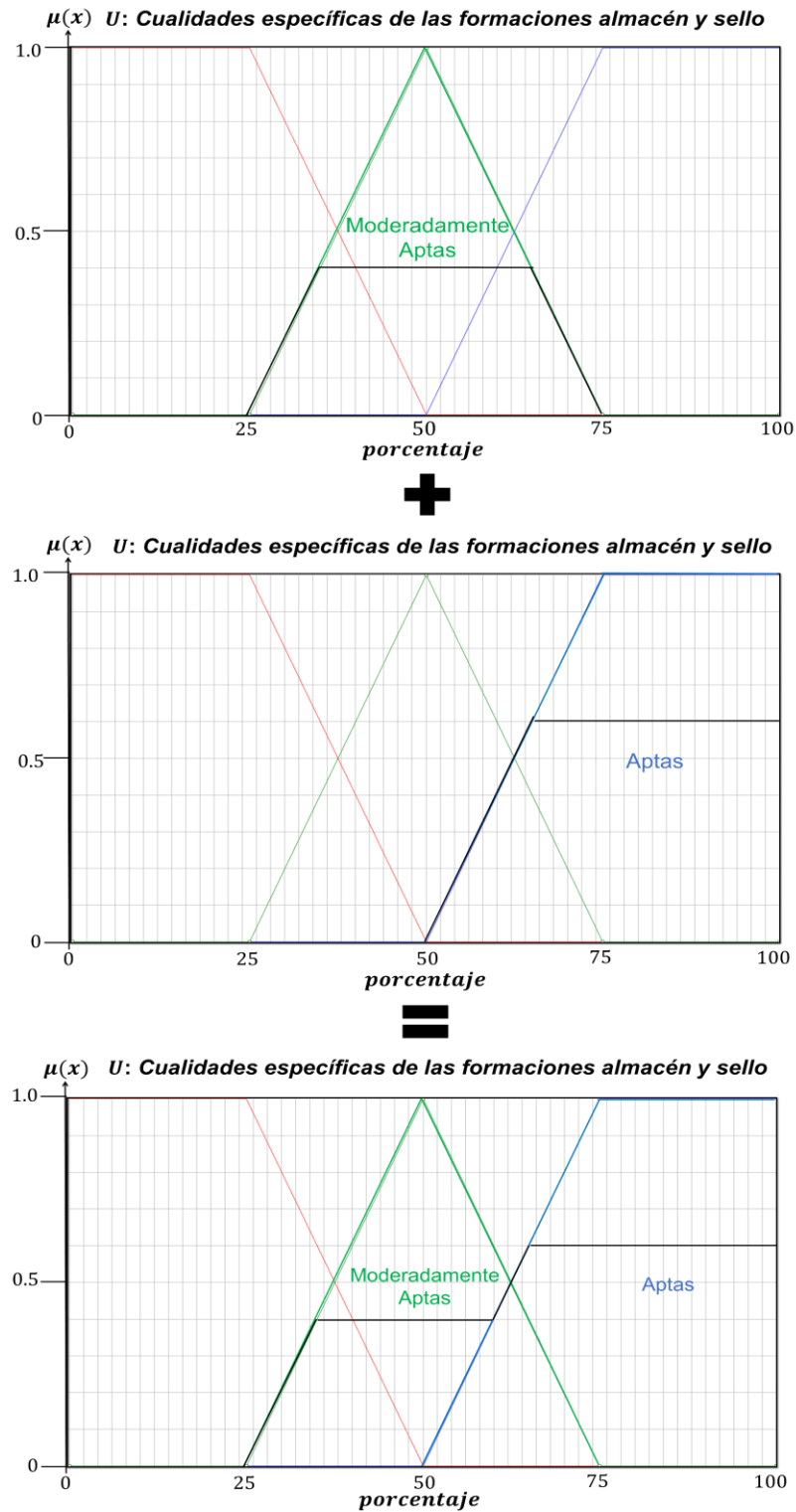


Figura III. 118. Proceso de agregación que permite calificar a las *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

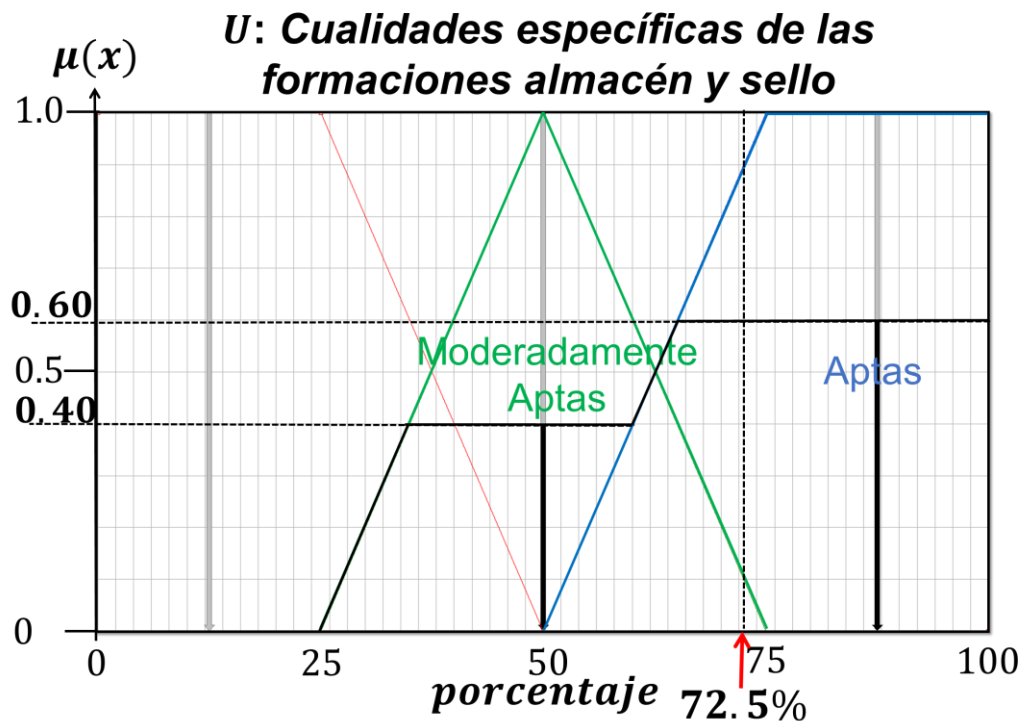


Figura III. 119. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

Variable 5: Cualidades geotérmicas y de presión

Para la quinta variable configurada en un sub sistema difuso con tres entradas y una salida, se presenta como ejemplo de regla activada la número 32 (**Figura III. 120**).

Es importante mencionar que la regla 32 mostrada como ejemplo, es a su vez la regla cuyo DoV es el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Moderada* de la variable lingüística *Disponibilidad*. Una vez completada la evaluación de reglas y determinados los DoV se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 121**), con esta información se determina la salida difusa. La salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide (**Figura III. 122**). Por tanto, se concluye que las *Cualidades geotérmicas y de presión* pertenecen:

- 1.00 al conjunto Aptas

Con un valor defuzzificado de 1.65 en la base de la variable *Cualidades geotérmicas y de presión*. Indicando que bajo las condiciones que se tienen, la fase de supercriticalidad es alcanzable sin problemas.

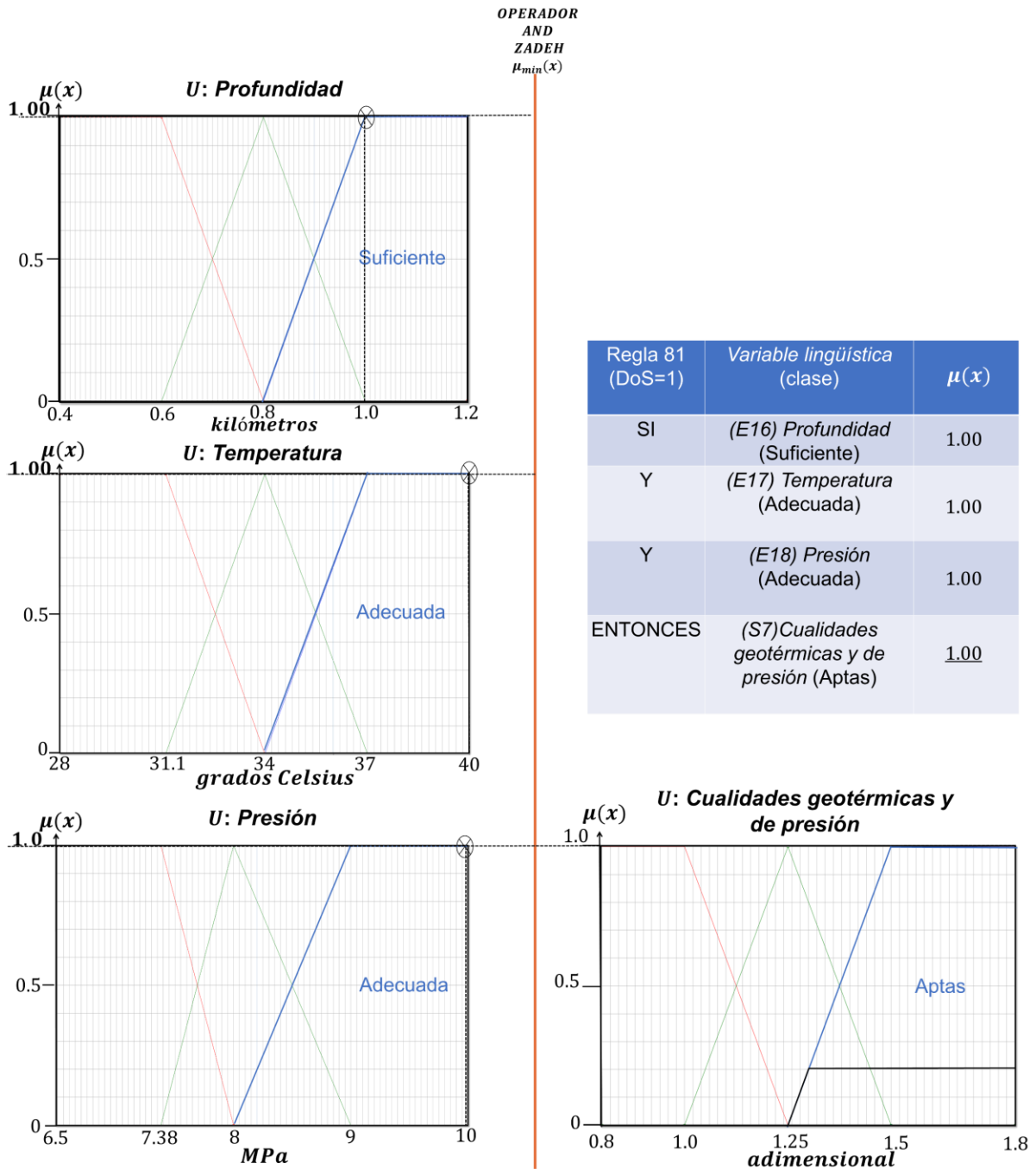


Figura III. 120. Proceso de análisis de la regla 81 para calificar *Cualidades geotérmicas y de presión*.

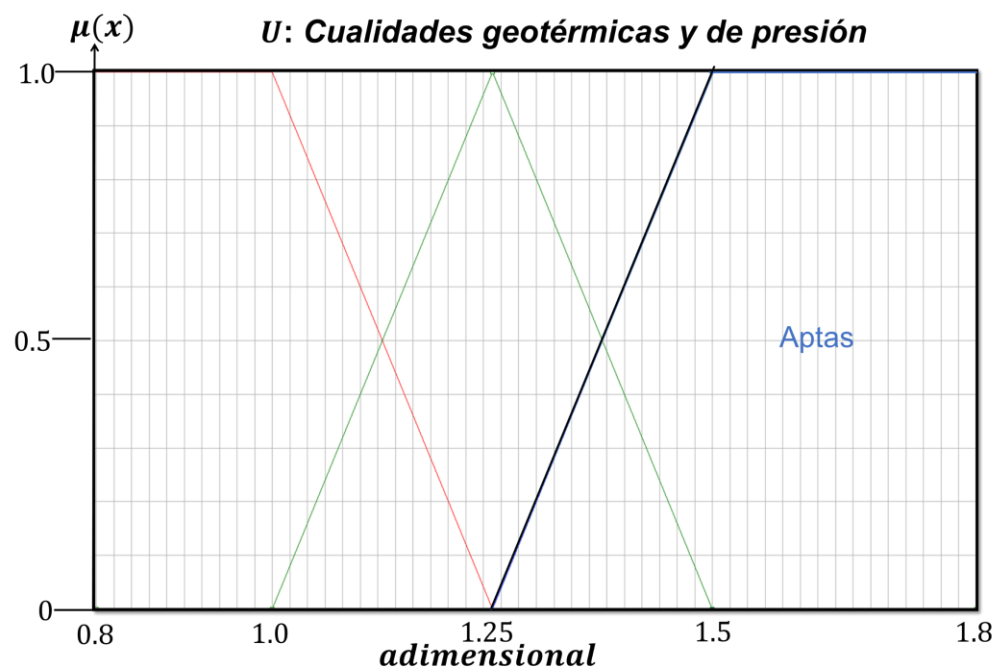
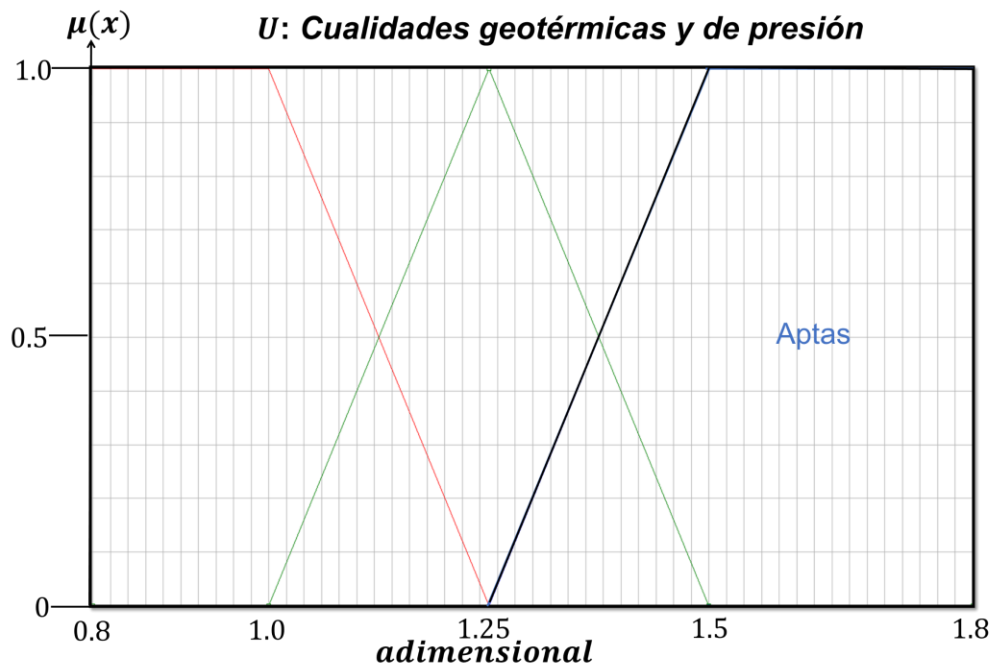


Figura III. 121. Proceso de agregación que permite calificar a las *Cualidades geotérmicas y de presión*.

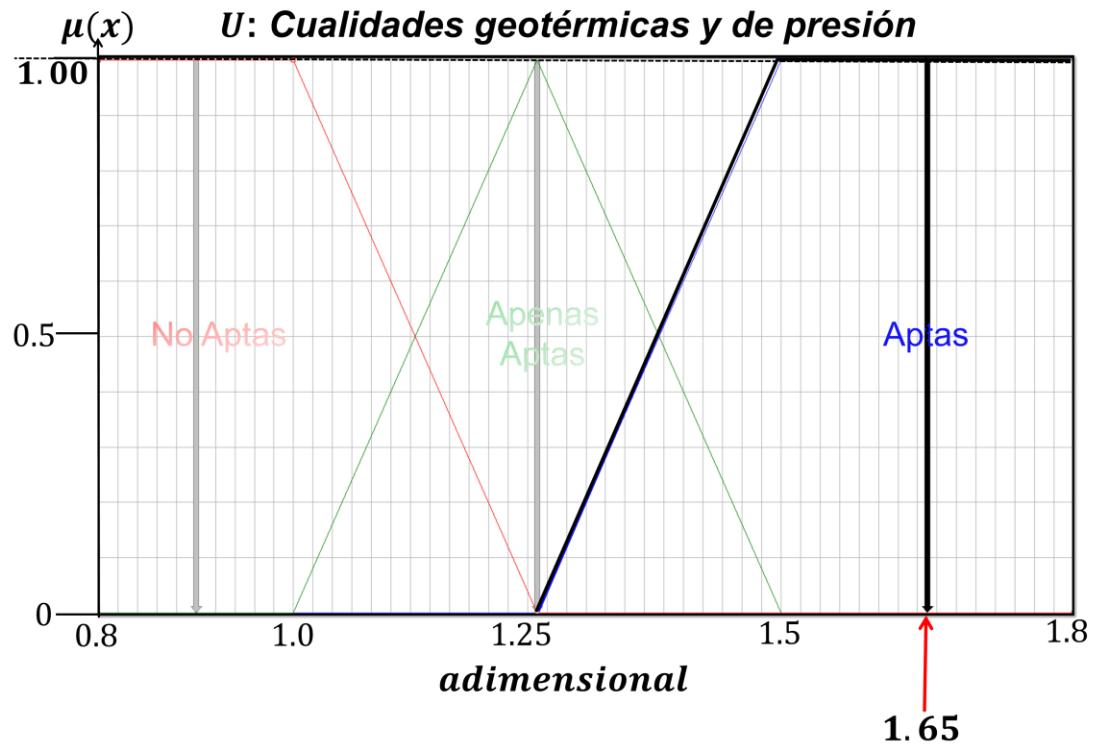


Figura III. 122. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello*.

Variable de salida final: Susceptibilidad.

Una vez fuzzificadas las seis variables de entrada del sistema difuso global se obtiene la calificación de la *Susceptibilidad*. Los valores de entrada fuzzificados se muestran en la **Tabla III. 13**.

Tabla III. 13. Información necesaria para calificar la *Susceptibilidad*.

Variable	Función de membresía (grado de membresía)
<i>Estado de la Emisión</i>	Notable (0.35)
	Extremo (0.65)
<i>Disponibilidad</i>	Mínima (0.4)
	Moderada (0.6)
<i>Tectónica</i>	Estable (1.0)
<i>Cualidades específicas de las formaciones almacén y sello</i>	Moderadamente Aptas (0.4)
	Aptas (0.6)
<i>Cualidades geotérmicas y de presión</i>	Aptas (1.0)
<i>Régimen hidrodinámico</i>	Adecuado (1.0)

Con estos valores se evalúan las reglas Si-Entonces que resultaron activadas, como ejemplo se muestran las reglas 1511 (**Figura III. 123**) y 1782 (**Figura III. 124**).

Es importante mencionar que las reglas 519 y 613 son a su vez aquellas cuyo DoV resulta el más alto de todas las reglas activadas para el conjunto difuso *Moderada* y *Alta* respectivamente de la variable lingüística *Susceptibilidad*. Una vez completado el análisis de todas las reglas activadas, se realiza el proceso de agregación (**Figura III. 125**), que permite obtener la salida difusa. La salida difusa se somete a defuzzificación mediante el método del centroide (**Figura III. 126**). Se concluye que la *Susceptibilidad* de un sitio a fungir como almacén geológico de Dióxido de Carbono pertenece:

- 0.40 al conjunto Moderada
- 0.60 al conjunto Alta

Con un valor defuzzificado de 0.78 en la base de la variable *Susceptibilidad*. Lo cual indica que el sitio cuenta con características adecuadas que permiten el desarrollo de un proyecto de almacenamiento geológico sin problema alguno.

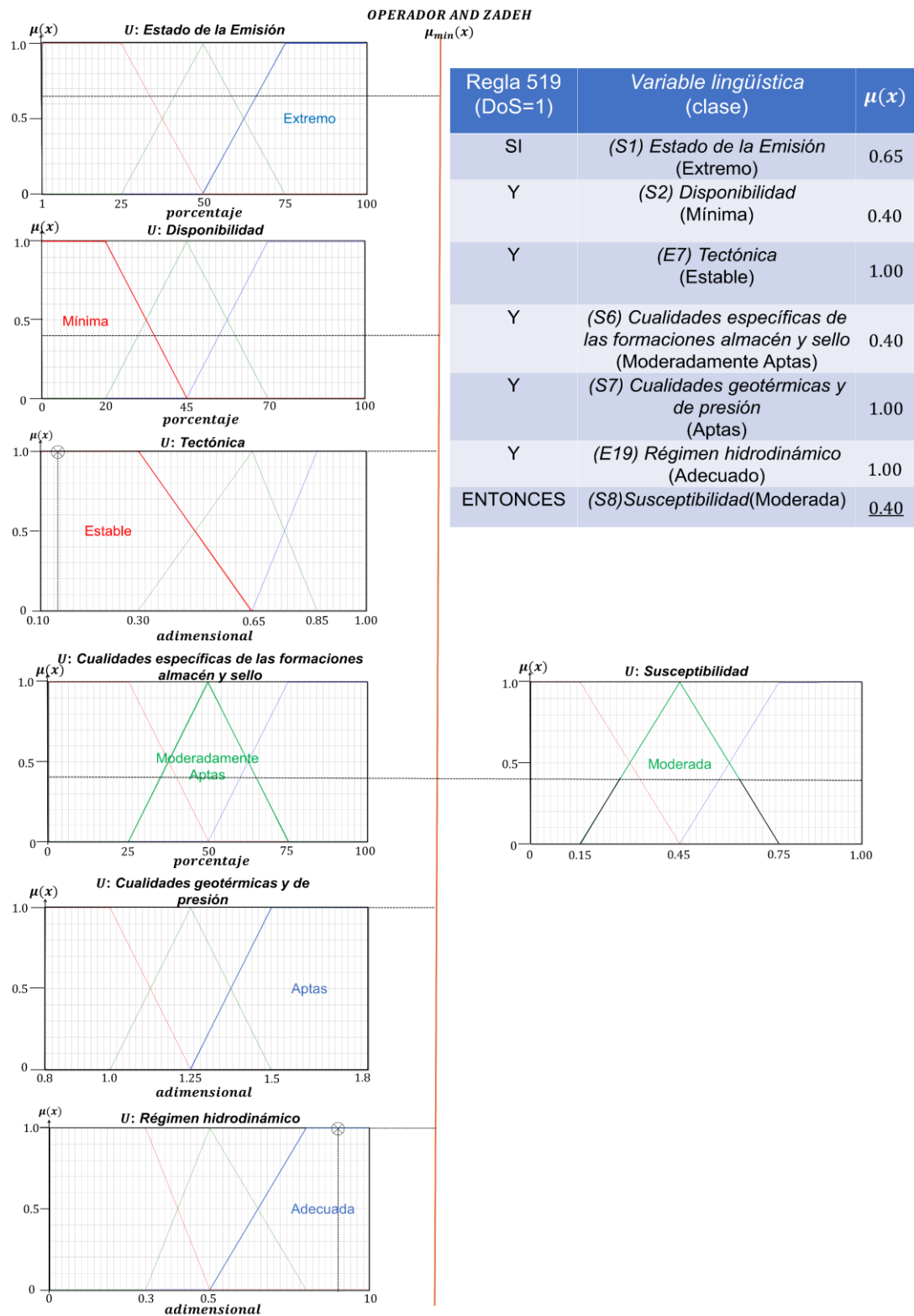


Figura III. 123. Proceso de análisis de la regla 519 para calificar *Susceptibilidad*.

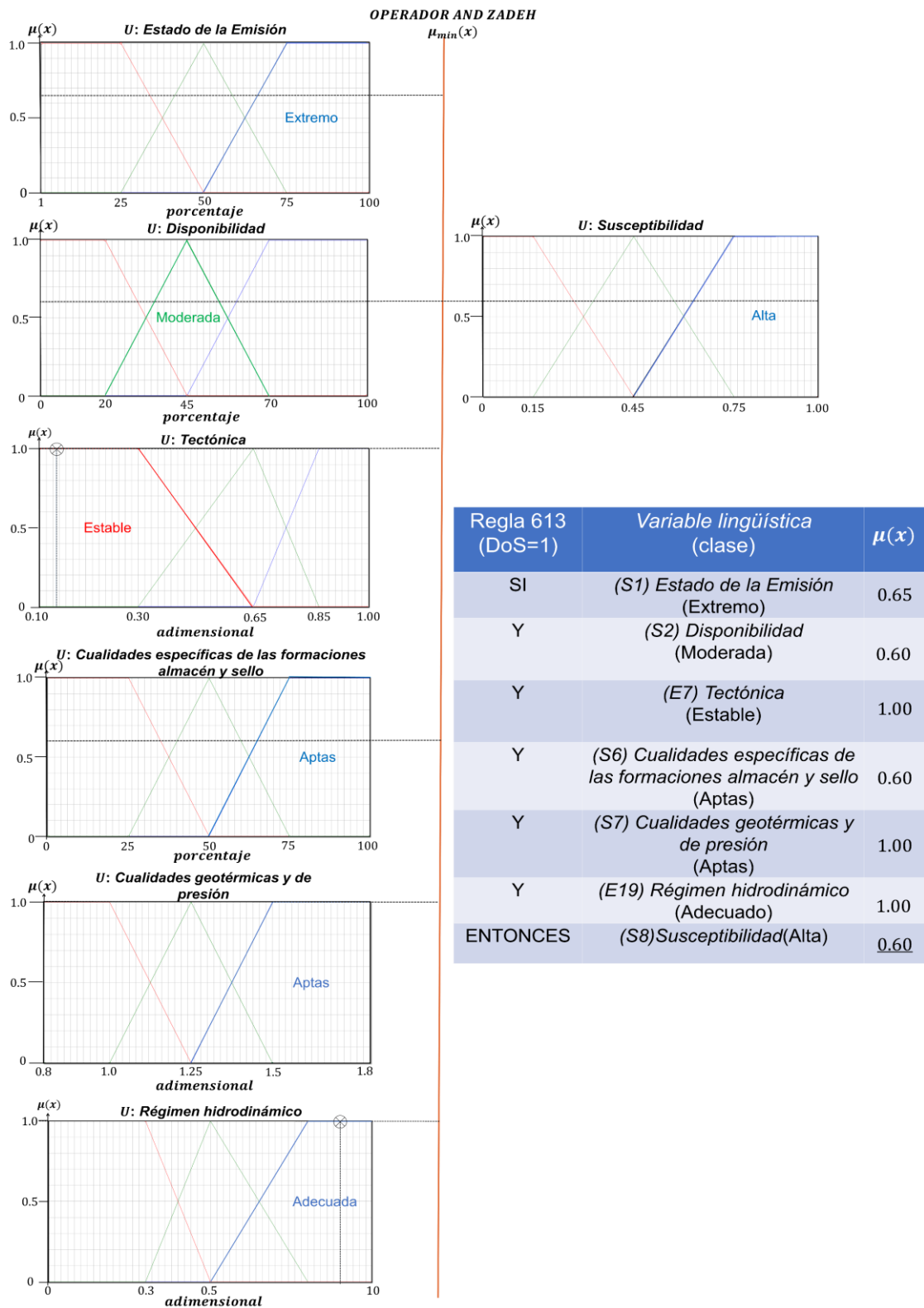


Figura III. 124. Proceso de análisis de la regla 613 para calificar *Susceptibilidad*.

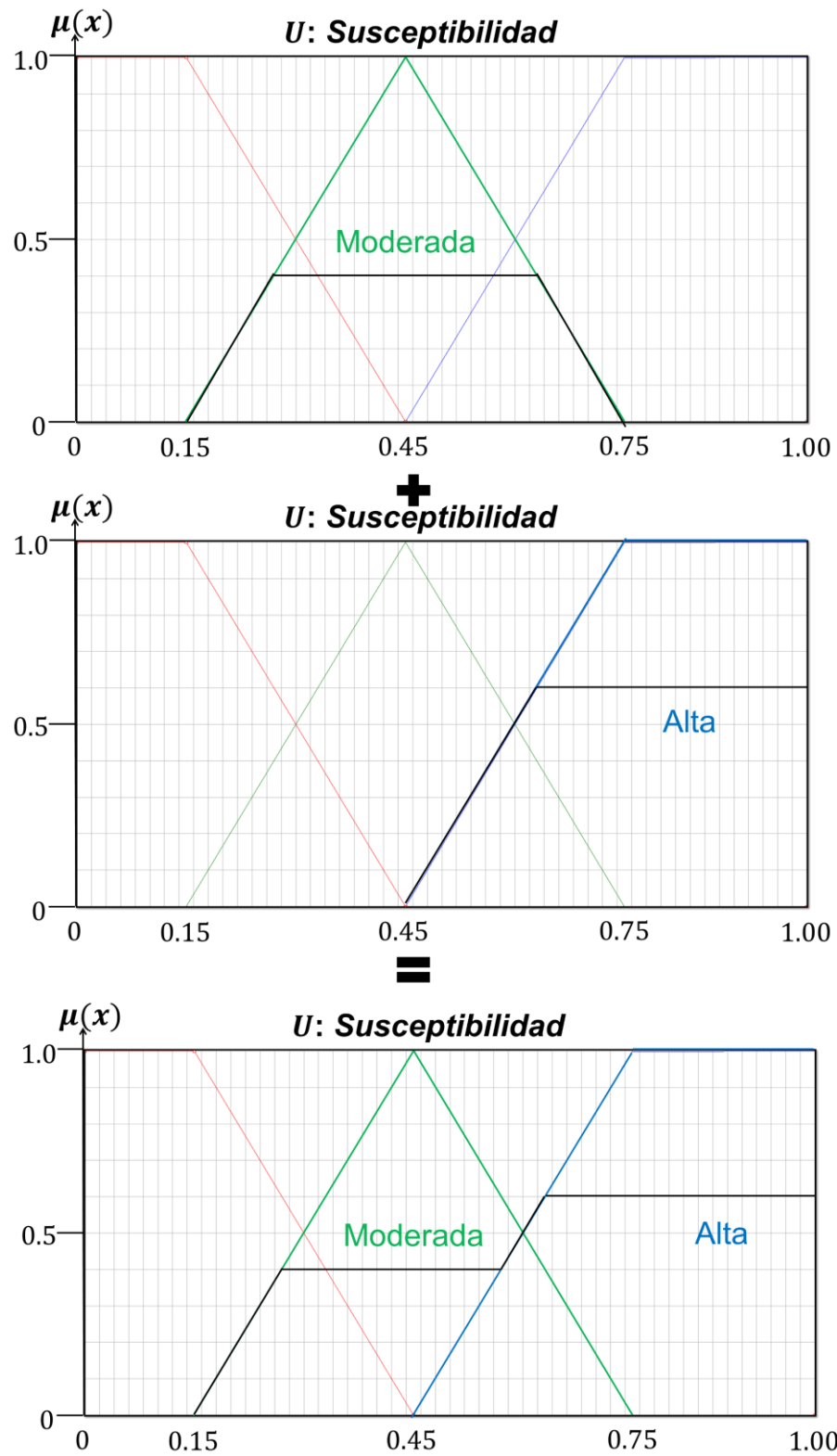


Figura III. 125. Proceso de agregación que permite calificar a las Susceptibilidad

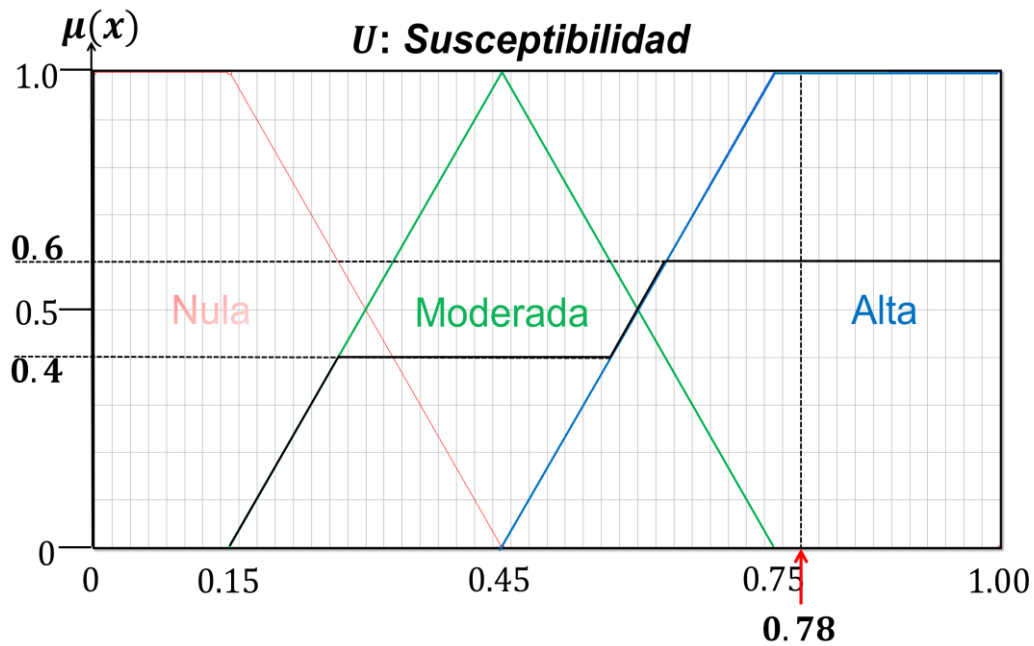


Figura III. 126. Defuzzificación mediante el método de centroide para la variable *Susceptibilidad*.

Sobre la aplicación se puede concluir que:

- La primer variable *Estado de la Emisión* obtuvo una calificación de 74.63%, considerando las variables *Tamaño* del parque industrial, *Fuerza Laboral* del complejo y *Giro* preponderante en el complejo. El valor indica que existen industrias presentes en la región cuya generación de emisiones de CO₂ tiende a ser extrema, a pesar de que en la región no hay industria eléctrica con emisión.
- Para la segunda variable *Disponibilidad* total de Infraestructura para la captura y el transporte del CO₂, la calificación obtenida fue 31% con base en la *Cobertura* de gasoductos dentro del parque industrial, Infraestructura de CCA (Captura, Compresión y Almacenamiento) y la *Comunicación* entre el sitio de captura con el del almacén. El valor obtenido indica la presencia de infraestructura pero que será necesaria inversión sobre medios para comunicar al sitio de captura con el sitio de almacén y los propios sistemas de captura.

- Para la tercera variable *Tectónica*, la definición es que el sitio está suficientemente alejado de la zona de generación sísmica.
- Para la cuarta variable *Cualidades específicas de la formación almacén y sello* se obtuvo una calificación de 72.5% considerando la *Calidad de la formación almacén* (65.5%), la *Calidad de la formación sello* (87.5%) y la *Configuración geométrica de las formaciones* (66%). La cualidad es tal que la inyección, la dispersión y el almacenamiento serán no-complejos y seguros.
- La quinta variable *Cualidades geotérmicas y de presión* tiene una calificación de 1.65, considerando las variables *Profundidad*, *Temperatura* y *Presión* al techo de la formación almacén. Lo que significa que los parámetros involucrados aseguran la fase supercrítica.
- La sexta variable *Régimen hidrodinámico* define al sitio del proyecto como uno en donde el agua de formación está gobernada por la topografía y existen indicios de compactación.

Las seis variables generan una calificación de *Susceptibilidad* de 0.78 (máxima calificación es 1.0 y la mínima es 0.01), es decir, las condiciones del sitio son adecuadas para el desarrollo de un proyecto de almacenamiento geológico de CO₂ con observaciones sobre la infraestructura y la determinación más específica de la formación almacén (geometría-cobertura).

Capítulo IV: Conclusiones

El uso de la computación inteligente (particularmente la lógica difusa) para tomas de decisión, contribuye de manera significativa a salvar obstáculos y sesgos en la comprensión de problemas cuando deben ser atendidos por grupos de diversos profesionales/administradores. La intención básica del sistema presentado es contar con un método simple y *transparente* que contribuya a encontrar los mejores resultados para la tarea asignada, en el menor tiempo y costo posibles.

El sistema difuso en esta investigación cumplió como una herramienta que permite calificar, de manera preliminar, la susceptibilidad de un sitio para fungir como almacén geológico de CO₂. La simulación basada en categorización e inferencias naturales al razonamiento ingenieril puede ser usada en la delimitación efectiva de las campañas de exploración en etapas avanzadas del proyecto.

Se reconoce que los parámetros involucrados en este sistema no agotan los necesarios para estudiar un sitio candidato, pero como premisa de investigación se considera que los complementarios (o incluso los presentados, pero en una versión más específica) serán abordados en etapas posteriores de análisis y selección. Además, las métricas propuestas pueden ser refinadas y, conforme más proyectos de almacenamiento se publiquen, este sistema podrá ser ajustado para contener la experiencia de dichos campos.

El desarrollo de esta tesis también busca llamar la atención del gremio ingenieril sobre la necesidad urgente de contribuir activamente en el combate al cambio climático, investigando y generando nuevas soluciones o perfeccionando las ya existentes, aplicando su experiencia y conocimientos, teniendo como objetivo atenuar las consecuencias que por desgracia ya se consideran inevitables.

Se recomienda que las instituciones educativas nacionales oferten a la brevedad carreras que aborden los temas de cambio climático, energías cero emisiones, energías limpias e inteligencia artificial, debido a que la demanda de profesionales con estos conocimientos será alta en el corto plazo.

Referencias

- Aizemberg D. (1997). **Vinculando Programación Lógica y Lógica Difusa**, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Anaya R. (2015). **Características geológicas de un campo petrolero en carbonatos naturalmente fracturados (Campo Ikal) como base para mejorar su explotación**. México: FI-UNAM.
- Andersen, M & Kleim D. (2014). **Defining and Determining Permeability**, *Oilfield Review* 26(3), 1-2.
- Ansarizadeh M et al. (2015). **El dióxido de carbono: Desafíos y oportunidades**. *Oilfield Review* 27 (2), 38 – 53.
- Bachu, S., (2000). **Sequestration of CO2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change**. *Energy Conversion and Management*, 41, 953-970.
- Bachu., S. (2003). **Screening and Ranking of sedimentary basins for sequestration of CO2 in geological media in response to climate change**. *Environmental Geology* 44, 277 - 289.
- Báez., J & Martínez., M. (2014). **Análisis de Pruebas de Presión en Yacimientos Fracturados Vugulares y su comparación con Yacimientos Homogéneos y de Doble Porosidad**. México: ESIA Ticomán IPN.
- Baños F & Sánchez C. (2009). **Yacimientos Petroleros Debajo de la Sal**, México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- Barrueta E. (2020). **Plan para almacenar crudo en el yacimiento Akal**. México: *Energía a Debate*
- Benavides., H & León., G. (2007). **Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático**. Colombia: Instituto de Hidrología, Metrología y Estudios Ambientales.
- Benson., S & Cook., P. (2005). **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Chapter 5**. *Underground Geological Storage*.

- Caja., N. (2017). **Correlación Litoestratigráfica de la Formación Yumagual comprendida en los sectores de Ronquillo, Puyllucana y la Encañada, 2017.** Perú: Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Cajamarca.
- Calzada., J. (2015). **Implementación de un sistema de predicción de falla de resistencias eléctricas en hornos de sostenimiento de temperatura de aluminio basado en Lógica Difusa.** Querétaro, México: Centro de Tecnología Avanzada Querétaro (CIATEQ).
- Cao., C; Liu., H & et al. (2020). **A review of CO₂ Storage in View of Safety and Cost-Effectiveness**, *Energies*,1(13) : doi: 10.3390/en13030600
- CENAPRED. (2014). **Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos.** México: SEGOB.
- CIEMAT. (2006), **Almacenamiento Geológico de CO₂. Criterios de Selección de Emplazamientos**, España: CIEMAT, ISSN:1135-9420.
- CONAMA. (2008). **Sostenibilidad de los recursos energéticos fósiles y minerales: uso racional en el abastecimiento y el consumo**, España: CIEMAT.
- Corporación Financiera Internacional. (2012). **Measuring Jobs from micro, small, and médium-size enterprises financed by IFC client financial institutions**, Reino Unido: Grupo del Banco Mundial.
- Cortes., C. (2012). **Sustitución de la línea conductora de 48” D.N a base de perforación horizontal dirigida en el cruzamiento del rio Tecolutla de gasoducto Cactus- San Fernando.** México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- Dávila., M. (2012). **Estado del almacenamiento Geológico de CO₂ en México.** México: Academia Mexicana de Ingeniería.
- Dávila., M. (2011). **Pertinencia de la implementación de la tecnología CCUS en México.** México: Academia Mexicana de Ingeniería, Documento de Enfoque.
- Dávila., M. (2011). **Viabilidad técnica y ambiental para el almacenamiento geológico de CO₂ en México.** México: IPN.
- Del Moral., J. (2013). **Análisis de estratigrafía de secuencias del Mioceno en los cubos Najucal y Jimba en la Cuenca Terciaria de Veracruz.** México: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería FI UNAM.

- Deroncourt., F. (2013). **Introduction to fuzzy logic**. EUA: Massachusetts Institute of Technology.
- Diciembre., S. (2017). **Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)**. España: Universidad Jaume.
- Dirección General de Gas Natural y Petroquímicos (DGGNP). (2019). **Estatus de la Infraestructura de Gas Natural**. México: SENER.
- Duana., D, et al. (2010). **Los parques industriales y su impacto económico en el Estado de México**. México: UAEM.
- Feltan., C & Caballero., A. (2016). **Principios de Lógica Difusa**. Argentina: Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones.
- Flett., M, et al. (2004). **Heterogeneous Saline Formations: Long term Benefits for Geo-sequestration of Greenhouses Gases**. Canada.
- Flores., I. (2017). **Aplicación de una metodología para la interpretación de plays subsalinos**. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Galarza., C. (2013). **Almacenamiento geológico de CO₂: una solución para la mitigación del cambio climático**. Química y Medio Ambiente, 109 (1), 20-26.
- Gale J, et al (2005). **La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono**. ONU: IPCC.
- Ganat T, (2020) **Fundamentals of Reservoir Rock Properties**, Malasia: Springer.
- Ghaderi., A & Landro., M. (2009). **Estimation of thickness and velocity changes of injected carbon dioxide layers from prestack time-lapse seismic data**. Geophysics 74(2), 17-28.
- Global CCS Institute (2019). **Global Status of CCS 2019: Targeting Climate Change**. Global CCS Institute.
- Global CCS Institute (2020). **Global Status of CCS 2020: Targeting Climate Change**. Global CCS Institute.
- González., C. (2011). **Lógica Difusa**. España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Guzmán., D & Castaño., C, **La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro**. Ciencia y Tecnología 24(2), 87-107.

- Hovorka S & Lu J. (2019). **Science of Carbon Storage in Deep Saline Formations Chapter 3 : Field Observations of Geochemical Response to CO₂ Injection at the Reservoir Scale**. Elsevier.
- IEA. (2020). **Global Energy Review 2020: The impact of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions**. Francia: International Energy Agency.
- IPCC. (2005). **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Canada: Cambridge University Press.
- IPCC. (2006). **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Canada: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Canada: Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). IPCC. (2005). **Climate Change 2021 The Physical Science Basis**. Organización de las Naciones Unidas..
- Ji X & Zhu C, “**CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers**, Novel Materials for Carbon Dioxide Mitigation Technology. Elsevier: 299-332.
- Kaldi., J. & Gibson-Poole., C. (2008). **Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO₂ Storage Projects**. CO₂CRC: Report N°: RPT08-1001.
- Kazsuba, J et al. (2005). **Carbon Dioxide Reaction Processes in a Model Btine Aquifer at 200°C and 200 bars: Implications for Geologic Sequestration of Carbon**, *Geochemistry* 18 (7) pp. 1065-1080
- Herzog H. (2009). **Carbon Dioxide Capture and Storage**, EUA: Massachusetts Institute of Technology.
- López., D. (2002). **Herramientas de CAD para el desarrollo de sistemas difusos**. España: Instituto de Microelectrónica de Sevilla, Universidad de Sevilla.
- López., M. (2015). **Perfil Productivo e Infraestructura de los Parques Industriales en el Estado de México**. México: UAEM.
- Lorenzo., E & Morato., A. (2018). **Geología del Petróleo**. Ecuador: Serie de Textos Académicos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería Universidad Estatal Península de Santa Elena.

- Mariño., J & Moreno., L. (2018). **Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia- caso Tauramena (Casanare).** Colombia: Boletín de Geología 40(1), 109-122 doi: 10.18273/revbol.v40n1-2018007.
- Martínez., V & Nava., T. (2008). **Estado del arte del secuestro geológico de CO₂ y aplicaciones.** México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- Másmela., A. (2015). **Desarrollo de una herramienta basada en lógica difusa que soporta la planificación de la gestión riesgos para proyectos de construcción, sometida a las pautas de dirección de proyectos PMI.** Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Morales – Luna. (2002). **Introducción a lógica difusa.** México: CINVESTAV-IPN.
- Mota J. (2013). **Evaluación de la capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ en la región de San Fernando, Tamaulipas.** México: FI UNAM.
- Muñoz., C, et al. (2010). **Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento.** España: Agrupación de fabricantes de cemento de España.
- Nava., A. (2014). **Análisis de las condiciones del equipamiento e infraestructura urbano-industrial de los parques industriales en el Estado de México, 1980-2010.** México: UAEM.
- Nekabari, et al. (2016). **Eor Processes, Opportunities and Technological Advancements.** INTECH: Chemical Enhanced Oil Recovery.
- NELT., (2017). **Site screening, site selection, and Site Characterization for Geological Storage Projects.** EUA: US Departmente of Energy Office of Fossil Energy.
- Pérez., A, Gómez., M & Carrera., J. (2009). **El almacenamiento geológico de CO₂, una de las soluciones al efecto invernadero.** España: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.
- Pérez., R. (2005). **Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos.** España: Universitat Politècnica de Catalunya
- Ramírez., R. (2011). **Almacenamiento Geológico de CO₂.** México: FI-UNAM.

- Rodríguez., J. (2018). **Centros de gravedad y centroides**. Perú: Universidad Pontificia de Perú.
- Rochelle C et al (2004). **Geological Storage of Carbon Dioxide**.Inglaterra: Sociedad Geológica.
- Ruiz., C. (2014). **Almacenamiento Geológico de CO₂. Criterios de Selección de Emplazamientos**. España: CIEMAT.
- Samanta., D. (2018). **Chapter 5 Defuzzification Methods**. India: Indian Institute of Technology Kharagpur.
- Sandoval D. (2019). **Viabilidad técnica para el almacenamiento del CO₂ en lechos de carbón en México**. México: IPN.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). **Tectónica de placas**. México:SGM.
- Shahzad U. (2015). **Global Warming: Causes, Effect and Solutions**. Durreesamin Journal: 1-7, ISSN: 2204-9827.
- Shi J & Duruncan S. (2005). **CO₂ storage in caverns and mines**. IFP: Oil & gas Science and Technology (60) 3, 569-571.
- Silvestre-Albero et al. (2014). **Retos actuales para la captura y almacenamiento de CO₂**. España: Química y medio ambiente, Real sociedad española de química.
- Smith E et al. (2021). **The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling**, Abu Dhabi UAE: 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-15.
- Sumida K et al (2012). **Carbon Dioxide Capture in Metal – Organic Frameworks**. USA: Chemical Rev 112, 724 – 781.
- Téllez R. (2014). **Evaluación geológico – petrolera de yacimientos de aceite pesado, caso Sonda de Campeche**. México: FI-UNAM.
- Underschultz., J, et al. (2016). **Carbon Capture and Storage**. Australia: Sustainability in the Mineral and Energy Sectors.
- Valle., L. (2015). **Caracterización de parámetros petrofísicos relacionados con la capacidad de almacenamiento de CO₂ en el acuífero salino profundo de Hontomín (BURGOS)**. España: Universidad Politécnica de Madrid.

- Velasco., J. (2017). **Digital oil field Combinación de tecnología e información para aumentar la integridad de activos, producción y reducción de costos.** Colombia: Pontificia Universidad Javierana.
- Vicent., I. (2014). **Conjuntos difusos: aplicación al control de procesos.** España: Univeritat Jaume.
- Wallington., T, et al. (2014). **Greenhouses gases and global warming.** EUA: Enviromental and Ecological Chemistry EOLSS.
- Wang., G. (2018). **Reservoir Permeability Evolution during the Process of CO2-Enhanced Coalbed Methane Recovery.** Energies, 2996 (11). doi:10.3390/en11112996.
- Wilcox J. (2012). **Carbon Capture. USA: Springer.**