

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**TESIS DE ESPECIALIZACIÓN
INGENIERÍA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS**

**ERRORES INDUCIDOS POR EL USO DE LA ECUACIÓN DE
MANNING EN EL DISEÑO DE ALCANTARILLADO DE AGUAS DE
PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.**

Preparado por:
Ing. Sandra Melissa Rojas Arbeláez

Asesor:
M Sc. Juan G. Saldarriaga

Informe Final Tesis

Bogotá, Enero de 2012

TABLA DE CONTENIDO

1	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
2	ESTADO DEL ARTE	2
2.1	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN TUBERÍAS CIRCULARES FLUYENDO PARCIALMENTE LLENAS	2
2.2	ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH	3
2.3	ECUACIÓN DE MANNING	6
2.4	FACTORES QUE AFECTAN EL “N” DE MANNING.....	9
2.5	APROXIMACIONES EN LA COMPARACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MANNING CON LA DE DARCY-WEISBACH.....	12
2.6	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO	13
3	METODOLOGÍA	17
3.1	PROCEDIMIENTO PARA LA COMPROBACIÓN DE DISEÑO.....	17
3.2	PROGRAMAS PLANTEADOS	18
3.3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	23
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
4.1	VARIACIÓN DEL $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$: CAUDALES RESULTANTES Y PORCENTAJE DE ERROR ($KS = 4.6 \times 10^{-5} M$)	24
4.2	VARIACIÓN DEL $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$: CAUDALES RESULTANTES Y PORCENTAJE DE ERROR ($KS = 2.9 \times 10^{-3} M$)	42
4.3	ERROR PORCENTUAL DEL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE MANNING VS. EL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE DARCY - WEISBACH (KS Y v CONSTANTE)	60
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
6	BIBLIOGRAFÍA.....	87
7	ANEXOS	88
7.1	GRÁFICAS DEL PORCENTAJE DE ERROR DEL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE MANNING VS. EL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE DARCY – WEISBACH (KS Y v CONSTANTES), PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. RELACIONES GEOMÉTRICAS EN TUBERÍAS CIRCULARES.....	2
FIGURA 2. DIAGRAMA DE MODDY.....	4
FIGURA 3. CURVA DESARROLLADA POR CAMP (1946).....	9
FIGURA 4. VARIACIÓN DEL n DE MANNING CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE FLUJO PARA TUBERÍA DE ACERO AL CARBÓN ($K_S = 0.0045$ MM).	10
FIGURA 5. COMPARACIÓN DE LA CURVA DE CAMP CON LAS ECUACIONES PROPUESTAS POR DIVERSOS AUTORES PARA EL CÁLCULO DEL n DE MANNING VARIABLE PARA FLUJO A SUPERFICIE LIBRE.	12
FIGURA 6. DRENAJE DE FONDO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO TRATADO.	14
FIGURA 7. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA RESPECTO A LA TEMPERATURA Y.....	15
FIGURA 8. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 4''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	25
FIGURA 9. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	25
FIGURA 10. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 6''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	27
FIGURA 11. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	28
FIGURA 12. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 8''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	30
FIGURA 13. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	30
FIGURA 14. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 10''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	32
FIGURA 15. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	33
FIGURA 16. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 12''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	35
FIGURA 17. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	35
FIGURA 18. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 14''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	37
FIGURA 19. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	38
FIGURA 20. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 16''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.	40
FIGURA 21. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	40
FIGURA 22. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 4''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.	43
FIGURA 23. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	43
FIGURA 24. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 6''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.	45
FIGURA 25. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	46
FIGURA 26. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 8''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.	48
FIGURA 27. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	48
FIGURA 28. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 10''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.	50
FIGURA 29. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(u)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	51
FIGURA 30. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(u)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 12''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.	53

FIGURA 31. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	53
FIGURA 32. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 14''$ Y $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$,.....	55
FIGURA 33. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	56
FIGURA 34. VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $D = 16''$ Y $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$,.....	58
FIGURA 35. PORCENTAJE DE ERROR DE $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_{DW}(v)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$,.....	58
FIGURA 36. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	61
FIGURA 37. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	62
FIGURA 38. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	64
FIGURA 39. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	65
FIGURA 40. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	68
FIGURA 41. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	70
FIGURA 42. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 1.007 \times 10^{-6} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	74
FIGURA 43. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 1.007 \times 10^{-6} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$,.....	76
FIGURA 44. VALOR ABSOLUTO DE LOS PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$,.....	82
FIGURA 45. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	89
FIGURA 46. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	90
FIGURA 47. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$, CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	91
FIGURA 48. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	92
FIGURA 49. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	93
FIGURA 50. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	94
FIGURA 51. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$, CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	95
FIGURA 52. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	96
FIGURA 53. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	97
FIGURA 54. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$ CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	98
FIGURA 55. PORCENTAJE DE ERROR $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	99

FIGURA 56. PORCENTAJE DE ERROR Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) VS. $Q_M(N_{CAL})$ CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	100
FIGURA 57. PORCENTAJE DE ERROR Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) VS. $Q_M(N_{VTC})$ CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	101
FIGURA 58. PORCENTAJE DE ERROR Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) VS. $Q_M(N_{CAL})$ CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	102
FIGURA 59. PORCENTAJE DE ERROR Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) VS. $Q_M(N_{VTC})$ CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	103
FIGURA 60. PORCENTAJE DE ERROR Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) VS. $Q_M(N_{CAL})$ CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.	104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE FLUJO EN TUBERÍAS CIRCULARES.....	2
TABLA 2. RUGOSIDADES ABSOLUTAS (K_S) PARA DIFERENTES MATERIALES DE TUBERÍAS.....	5
TABLA 3. VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N	8
TABLA 4. ECUACIONES PROPUESTAS PARA CALCULAR EL N DE MANNING VARIABLE.....	11
TABLA 5. DIÁMETROS DE LA TUBERÍA DE ACERO AL CARBÓN SEGÚN LA NORMA NTC-3470.....	16
TABLA 6. VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y DENSIDAD DEL FLUIDO EVALUADAS.....	18
TABLA 7. VISTA DEL PROGRAMA DE COMPROBACIÓN DE DISEÑO – DARCY- WEISBACH Y COLEBROOK- WHITE.....	20
TABLA 8. VISTA DEL PROGRAMA DE COMPROBACIÓN DE DISEÑO – ECUACIÓN DE MANNING.....	22
TABLA 9. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 4''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	24
TABLA 10. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 6''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	27
TABLA 11. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 8''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	29
TABLA 12. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 10''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	32
TABLA 13. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 12''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	34
TABLA 14. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 14''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	37
TABLA 15. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 16''$ Y $K_S = 4.6 \times 10^{-5}$ M.....	39
TABLA 16. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 4''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	42
TABLA 17. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 6''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	45
TABLA 18. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 8''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	47
TABLA 19. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 10''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	50
TABLA 20. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 12''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	52
TABLA 21. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 14''$ Y $K_S = 2.9 \times 10^{-3}$ M.....	55

TABLA 22. RESUMEN DE LA VARIACIÓN DE $Q_{DW}(v)$, $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$ Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ERROR CUANDO $D = 16''$ Y $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$	57
TABLA 23. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$	63
TABLA 24. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 3.02 \times 10^{-3} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$	63
TABLA 25. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$	66
TABLA 26. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 7.01 \times 10^{-4} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$	66
TABLA 27. RANGO DE PENDIENTES PARA LOS CUALES EL PORCENTAJE DE ERROR ES MENOR AL 25%, 10% Y 1% PARA LA COMPARACIÓN $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$	69
TABLA 28. RANGO DE PENDIENTES PARA LOS CUALES EL PORCENTAJE DE ERROR ES MENOR AL 25% PARA LA COMPARACIÓN $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 2.9 \times 10^{-3} M$...	71
TABLA 29. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$	72
TABLA 30. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 9.29 \times 10^{-5} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$	72
TABLA 31. RANGO DE PENDIENTES PARA LOS CUALES EL PORCENTAJE DE ERROR ES MENOR AL 25% PARA LA COMPARACIÓN $Q_{DW}(v = 1.007 \times 10^{-6} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$ Y $Q_M(N_{CAL})$, CUANDO $KS = 4.6 \times 10^{-5} M$.	75
TABLA 32. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 1.007 \times 10^{-6} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{VTC})$	77
TABLA 33. MENORES Y MAYORES PORCENTAJES DE ERROR ENCONTRADOS PARA LAS DOS RUGOSIDADES ABSOLUTAS EVALUADAS CUANDO SE COMPARA $Q_{DW}(v = 1.007 \times 10^{-6} M^2/S)$ VS. $Q_M(N_{CAL})$	77
TABLA 34. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA UNA DE LAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS, VISCOSIDADES Y DIÁMETROS CONSIDERADOS PARA EL ESTUDIO.	78

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. ANGULO DE LA SUPERFICIE DEL AGUA.....	2
ECUACIÓN 2. PERÍMETRO MOJADO.....	2
ECUACIÓN 3. ÁREA MOJADA.....	2
ECUACIÓN 4. RADIO HIDRÁULICO.....	2
ECUACIÓN 5. ANCHO EN LA SUPERFICIE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	2
ECUACIÓN 6. ECUACIÓN GENERAL DE DARCY--WEISBACH.....	3
ECUACIÓN 7. ECUACIÓN DE COLEBROOK- WHITE.....	4
ECUACIÓN 8. NÚMERO DE REYNOLDS.....	5
ECUACIÓN 9. ECUACIÓN DE DARCY- WEISBACH PARA TUBERÍAS A FLUJO LIBRE.....	5
ECUACIÓN 10. FÓRMULA DE MANNING.....	7
ECUACIÓN 11. RELACIÓN ENTRE EL N DE MANNING Y LA ECUACIÓN DE DARCY--WEISBACH.....	10
ECUACIÓN 12. ESTIMACIÓN DEL N DE MANNING DESCRITA POR ZAGHLOUL (1993).....	11
ECUACIÓN 13. ESTIMACIÓN DEL N DE MANNING DESCRITA POR WRONG Y ZHOU (2003).....	11
ECUACIÓN 14. ESTIMACIÓN DEL N DE MANNING DESCRITA POR AKGIRAY (2005).....	11
ECUACIÓN 15. ESTIMACIÓN DEL N DE MANNING DESCRITA POR AKGIRAY (2005).....	11
ECUACIÓN 16. PORCENTAJE DE ERROR DEL CAUDAL CUANDO SE EMPLEA PARA SU CÁLCULO LA ECUACIÓN DE MANNING Y LA ECUACIÓN DE DARCY- WEISBACH.....	23

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s
μ	Viscosidad dinámica	N*s/m ²
θ	Ángulo comprendido entre las dos líneas que parten del centro de la sección transversal y se dirigen hacia los puntos de contacto entre la lámina de agua y la tubería	radianes
γ	Peso específico del Fluido	N/m ³
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas de Materiales).	-
A	Área transversal de flujo	m ²
d	Diámetro interno de la tubería	m
E_Q	Porcentaje de error	%
f	Factor de fricción	-
F_R	Número de Froude	-
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
H	Pérdidas de energía en un ducto con flujo uniforme	m
h_f	Pérdidas por fricción	m
k	Coefficiente de conversión de unidades para la ecuación de Manning	-
ks	Rugosidad absoluta de la tubería	m
l	Longitud de la tubería	m
L/s	Litros por segundo	-
n	Coefficiente de rugosidad de Manning	-
n_o	Coefficiente de rugosidad de Manning a flujo lleno	-
n_{VTC}	Coefficiente de Manning recomendado por Ven T. Chow para tubería en acero soldada y estirada	-
n_{CAL}	Coefficiente de Manning calculado aplicando la ecuación descrita por Zaghoul	-
P	Perímetro mojado	m
Q_M	Caudal calculado aplicando la ecuación de Manning	m ³ /s
Q_{DW}	Caudal calculado aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la de Colebrook-White	m ³ /s
Re	Número de Reynolds	-
R_H	Radio hidráulico de la tubería	m
S	Pendiente de la tubería	m/m
T	Ancho de la superficie de la sección transversal de una tubería	m
V	Velocidad de flujo	m/s
y_n	Profundidad normal de flujo	m

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

Han sido pocas las investigaciones publicadas que comparan los resultados obtenidos al utilizar la ecuación de Manning Vs la ecuación de Darcy-Weisbach para flujo libre.

La mayoría de los estudios sobre la comparación de la ecuación de Manning y la Ecuación de Darcy-Weisbach se han enfocado en establecer la relación que existe entre el n de Manning y el k_s para diferentes tuberías. Esto a fin de dar a los diseñadores que se muestran renuentes a la implementación de la fórmula de Darcy-Weisbach mejores herramientas de diseño para lograr disminuir los errores inducidos a la mala escogencia del n de Manning.

No existen antecedentes sobre estudios enfocados a encontrar los errores inducidos por el uso de la ecuación de Manning en el diseño de tubería de alcantarillado para fluidos con viscosidades y temperaturas variables.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Estimar los errores inducidos en el diseño de tuberías de alcantarillado de aguas de producción de petróleo por el uso de la ecuación de Manning Vs. la ecuación de Darcy-Weisbach.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar el desarrollo histórico de la ecuación de Manning y las restricciones bajo las cuales fue propuesta.
- Establecer los errores porcentuales de diseño inducidos por la variación de la viscosidad del fluido transportado.
- Recomendar el rango de viscosidades para el cual la ecuación de Manning puede ser aplicada.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN TUBERÍAS CIRCULARES FLUYENDO PARCIALMENTE LLENAS

A fin de verificar el caudal que puede transportar una tubería es necesario estimar el área mojada y el radio hidráulico, que están en función de la profundidad normal de flujo y del diámetro. Teniendo en cuenta la Figura 1, para una tubería circular, las propiedades geométricas se estiman según las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

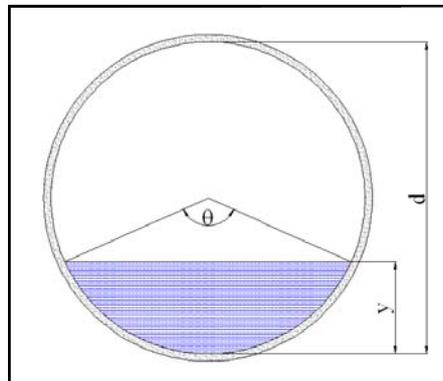


Figura 1. Relaciones geométricas en tuberías circulares.

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de la profundidad de flujo en tuberías circulares.

ECUACIÓN	FORMA
Ecuación 1. Angulo de la superficie del agua.	$\theta = \pi + 2 \arcsen \left(\frac{y - d/2}{d/2} \right)$
Ecuación 2. Perímetro mojado.	$P = \frac{1}{2} \theta d$
Ecuación 3. Área mojada.	$A = \frac{1}{8} (\theta - \text{Sen } \theta) d^2$
Ecuación 4. Radio hidráulico.	$R_h = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{Sen } \theta}{\theta} \right) d$
Ecuación 5. Ancho en la superficie de la sección transversal.	$T = d \cos \left(\arcsen \frac{y_n - d/2}{d/2} \right)$

2.2 ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

La ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación físicamente basada para describir las pérdidas de energía por unida de peso, o altura, debidas a la fricción entre el fluido fluyendo y la pared interna de la tubería que lo contiene. Es la ecuación de resistencia fluida más general para el caso de tuberías circulares fluyendo a presión, la cual es el resultado de aplicar las leyes físicas del movimiento de Newton. Fue establecida por Henry Darcy (1803-1858), utilizando experimentos de flujo en tuberías.

Los experimentos llevados a cabo por Darcy incluyeron diámetros desde 0.0122 hasta 0.5 m, mientras que los materiales de las tuberías incluyeron vidrio, hierro, plomo, hierro recubierto con bitumen, hierro fundido y latón. Las condiciones de la pared variaron desde material nuevo hasta material usado con incrustaciones y las velocidades promedio variaron en el rango de 0.03 hasta 6.01 m/s. La medición de los caudales se llevó a cabo por métodos volumétricos recolectando el agua en tanques aforados. Las longitudes de las tuberías fueron siempre superiores a 100 m, excepto para las tuberías de vidrio y plomo, las cuales fueron de 44.5 y 50 m respectivamente. Las caídas en las alturas piezométricas se midieron utilizando piezómetros, dejando de lado los primeros 4.7 m de tubería. (Saldarriaga, 2007).

Empleado los resultados experimentales de Darcy, Julius Weisbach en 1845 pudo obtener una ecuación físicamente basada, con la cual se logra predecir las pérdidas por fricción como función del fluido, la velocidad, el diámetro de la tubería y el tipo de material de esta. Esta ecuación se conoce mundialmente como la ecuación general de Darcy-Weisbach.

$$\frac{H}{l} = \frac{f V^2}{d 2g}$$

Ecuación 6. Ecuación general de Darcy-Weisbach.

De todos los parámetros de la ecuación de Darcy-Weisbach, el factor de fricción es el más difícil de estudiar ya que es una función compleja de la velocidad de flujo, de la densidad y de la viscosidad del fluido, del diámetro y de la rugosidad de la tubería. Esta complejidad, se reflejó en los intentos realizados por los investigadores como Ludwig Prandtl (1875-1953), Theodor Von Kármán (1881-1963), Paul Richard Heinrich Blasius (1883-1970) y Johann Nikuradse (1894-1979) para predecir analíticamente su magnitud. Sin embargo, en 1939, C.F Colebrook y C.M White lograron encontrar una relación matemática para describir el comportamiento de este en la zona de transición, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 7. Ecuación de Colebrook-White.

La rugosidad absoluta de la tubería (ks) está determinada por los materiales que conforman la pared interna de la misma. El estudio de la rugosidad en las tuberías lo inició el ingeniero Alemán Johann Nikuradse en 1933, quien llevó a cabo una serie de experimentos en los cuales utilizó tubos de diferentes diámetros y de “rugosidades artificiales” para obtener la relación ks/d (relación conocida como rugosidad relativa). En sus experimentos Nikuradse varió ampliamente el caudal por lo que sus hallazgos pudieron ser aplicados para el intervalo de flujo desde laminar hasta hidráulicamente rugoso.

Posteriormente, en 1940, el ingeniero norteamericano Lewis F. Moody, tomó tuberías comerciales de diferentes materiales, y experimentalmente logró establecer las pérdidas por fricción de las tuberías y calcular el factor de fricción para flujo hidráulicamente rugoso. Con el factor de fricción calculó la rugosidad relativa y con ésta y el diámetro, pudo calcular la rugosidad absoluta ks para diferentes materiales de las tuberías (Saldarriaga, 2007).

A partir de los resultados de sus experimentos Moddy construyó el diagrama mostrado en la Figura 2, el cual se conoce hoy en día como el diagrama de Moddy:

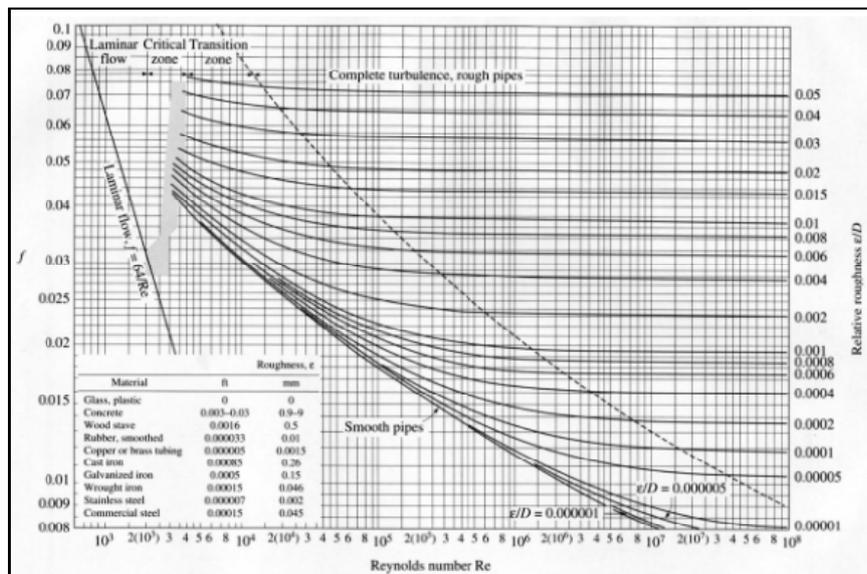


Figura 2. Diagrama de Moddy.
 Fuente: Saldarriaga, 2007.

En la actualidad, rangos usuales de ks pueden consultarse en textos de hidráulica como Hidráulica de Tuberías, (Saldarriaga, 2007); algunos valores típicos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Rugosidades absolutas (ks) para diferentes materiales de tuberías.

Material	ks (mm)
Vidrio	0.003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: Saldarriaga, 2007.

Por otro lado el número de Reynolds (Re) para el cálculo del factor de fricción f se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V d}{\nu}$$

Ecuación 8. Número de Reynolds.

Las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White también se pueden aplicar para canales y/o tuberías fluyendo parcialmente llenas, en cuyo caso, el diámetro es reemplazado por $4R_H$ (radio hidráulico), y el término H/L se describe como la pendiente de la tubería. De esta manera, al reemplazar el factor de fricción f , en la ecuación de fricción de Darcy-Weisbach se obtiene la ecuación general de diseño para calcular la velocidad y por tanto el caudal para flujo a superficie libre:

$$V = -2\sqrt{8gR_H S} \log_{10} \left(\frac{ks}{14.8R_H} + \frac{2.51\nu}{4R_H \sqrt{8gR_H S}} \right)$$

Ecuación 9. Ecuación de Darcy-Weisbach para tuberías a flujo libre.

A pesar que la ecuación de Colebrook-White es aplicable para ambos tipos de flujo (a presión y a superficie libre), está no fue empleada como herramienta de diseño por los ingenieros debido a la complejidad que implicaba para la época el cálculo del factor de fricción f por tratarse de una ecuación implícita. Este problema matemático ocasionó la aparición de ecuación empíricas más sencillas de utilizar. Sin embargo, en el futuro, la ecuación de Darcy-Weisbach debería ser usada ampliamente, hasta el punto de ser exclusiva tanto para flujo a presión como a superficie libre. Lo anterior se puede lograr gracias a la rapidez con que hoy se realizan cálculos en los computadores y calculadoras, una de las razones de peso por la que las fórmulas explícitas y menos complejas han tenido mayor éxito (American Society of Civil Engineers, 2007).

Adicionalmente, la Ecuación 8 presenta el cálculo de la velocidad de flujo de manera explícita, por lo que su empleo en el diseño de sistemas de alcantarillado no debe presentar ningún inconveniente para los ingenieros del drenaje urbano.

El hecho del empleo de otro tipo de ecuaciones radica en que los diseñadores se muestran renuentes al cambio argumentando que la ecuación de Darcy-Weisbach no puede ser usada en el diseño de alcantarillados ya que la acumulación de una capa de limo en la superficie de la tubería tiene un efecto desconocido en el valor del f , así valores de rugosidad relativa serían difíciles de estimar. Como respuesta a esta afirmación, tal efecto no es tan preocupante, ya que variaciones de k_s en la zona cercana al flujo hidráulicamente liso dentro de un rango razonable, resulta en pequeños cambios del valor de f (American Society of Civil Engineers, 2007). Además, tales efectos también se presentan al utilizar cualquier otra ecuación de resistencia fluida, por lo que no son exclusivos de la ecuación de Darcy – Weisbach.

La ecuación empírica más empleada para el diseño de tuberías y/o canales fluyendo parcialmente llenas es la ecuación de Manning, en cuyo desarrollo no se tiene en cuenta el efecto de la viscosidad del fluido sobre el cálculo de la velocidad de flujo. El desarrollo histórico de dicha ecuación se presenta a continuación.

2.3 ECUACIÓN DE MANNING

La fórmula de Manning recibe el nombre de uno de sus desarrolladores, el ingeniero Irlandés Robert Manning, quien después de la comparación de siete (7) fórmulas bien conocidas en su tiempo (Chézy y Eytelwein, Du Buat, Darcy y Bazin, Weisbach, Saint-Venant, Ganguillet y Kutter, y Neville, que figura en el apéndice de su artículo de 1891) y mediante el uso de los datos experimentales expedidos de 20 series de datos de Revy, Humphreys y Abbott, Du Buat, Ganguillet y Kutter, Bazin, Darcy, Ftely y Stearns, y Smith, estableció en 1885 la siguiente fórmula que se presentó en una reunión de la Institución de Ingenieros Civiles de Irlanda el 4 de diciembre de 1889 y publicada en 1891 (Powell, 1960).

$$V = \frac{k}{n} R_H^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 10. Fórmula de Manning.

donde k es 1.486 para el Sistema Anglosajón y 1.00 para Sistema Internacional, ya que al desarrollar el análisis dimensional de la fórmula se encuentra que el coeficiente n tiene unidades equivalentes a $[T L^{-1/3}]$.

Para la deducción del exponente de R_H , se hizo uso de datos experimentales de Bazin sobre canales artificiales. Para diferentes formas y rugosidades, el valor medio del exponente se encontró que varía desde 0.6499 hasta 0.8395. Considerando estas variaciones, Manning adoptó un valor aproximado de $2/3$ para el exponente. Sobre la base de otros estudios posteriores, algunos autores sugirieron un valor de $3/4$ y otros sugirieron una variable dependiendo de R_H y de n (Chow, 1982).

La fórmula de Manning ha sido ampliamente discutida por muchos autores como Flamant, Powell, Williams, Dooge, y otros. Al parecer Flamant fue el primer autor que llamó esta fórmula como la “fórmula de Manning” en su libro publicado en 1891. Desde entonces, esta ecuación ha sido ampliamente utilizada en la ingeniería hidráulica de las tuberías y canales abiertos, principalmente debido a su simplicidad.

Es importante anotar que si bien Manning señaló que la fórmula la dedujo de forma independiente en 1885, G.H.L Hagen con base en observaciones experimentales había deducido ya una expresión similar en 1876. Por otro lado, Manning no menciona Gauckler, que fue probablemente el primero en proponer una relación de este tipo $U = \lambda R^{2/3} S^{1/2}$ en 1867 (Maurizio Venutelli, 2008).

En la actualidad diversos rangos de valores de coeficiente de Manning se encuentran en la literatura. A continuación se muestran los recomendados por el Ingeniero Ven Te Chow en su libro Hidráulica de Canales Abiertos (1959) para ductos cerrados que fluyen parcialmente llenos:

Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad n .

Tipo de descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos.			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0,009	0,010	0,013
b. Acero			
1. Estriado y soldado	0,010	0,012	0,014
2. Riveteado y en espiral	0,013	0,016	0,017
c. Hierro fundido			
1. Recubierto	0,010	0,013	0,014
2. No recubierto	0,011	0,014	0,016
d. Hierro forjado			
1. Negro	0,012	0,014	0,015
2. Galvanizado	0,013	0,016	0,017
e. Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0,017	0,019	0,021
2. Drenaje de Aguas Iluvias	0,021	0,024	0,03
A-2. No Metal			
a. Lucita	0,008	0,009	0,010
b. Vidrio	0,009	0,010	0,013
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos.			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0,009	0,010	0,013
b. Acero			
1. Estriado y soldado	0,010	0,012	0,014
2. Riveteado y en espiral	0,013	0,016	0,017
c. Hierro fundido			
1. Recubierto	0,010	0,013	0,014
2. No recubierto	0,011	0,014	0,016
d. Hierro forjado			
1. Negro	0,012	0,014	0,015
2. Galvanizado	0,013	0,016	0,017
e. Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0,017	0,019	0,021
2. Drenaje de Aguas Iluvias	0,021	0,024	0,03
A-2. No Metal			
a. Lucita	0,008	0,009	0,010
b. Vidrio	0,009	0,010	0,013

Fuente: Ven Te Chow (1959). Los números más grandes son generalmente los valores recomendados para el diseño.

2.4 FACTORES QUE AFECTAN EL “n” DE MANNING

Una de las mayores dificultades de la aplicación de la fórmula de Manning reside en la determinación del coeficiente n , pues no hay un método exacto de seleccionar este valor. Es muy común pensar el n de Manning es constante para todas las condiciones de flujo, y a menudo se considera que el único factor importante para la selección de este coeficiente es la rugosidad de la superficie. Sin embargo, diversos estudios han dejado en evidencia que este es sólo uno de varios factores importantes.

Los coeficientes de rugosidad de Manning fueron originalmente deducidos para grandes canales de sección transversal rectangular con flujo turbulento hidráulicamente rugoso. Esto genera dudas acerca de la validez de usar la ecuación de Manning para el diseño de sistemas de alcantarillado (Swaffield & Bridge, 1983).

Para ductos circulares, Camp pudo mostrar que el valor de n para un ducto fluyendo parcialmente lleno es mayor que aquel para un conducto lleno. Utilizando medidas en una cañería limpia de aguas negras y drenes, ambos de arcilla y concreto, de tamaño desde 4 a 12 pulgadas, éste investigador encontró un aumento de aproximadamente un 24% en el valor de n a las profundidades medias, tal y como se muestra en la siguiente figura.

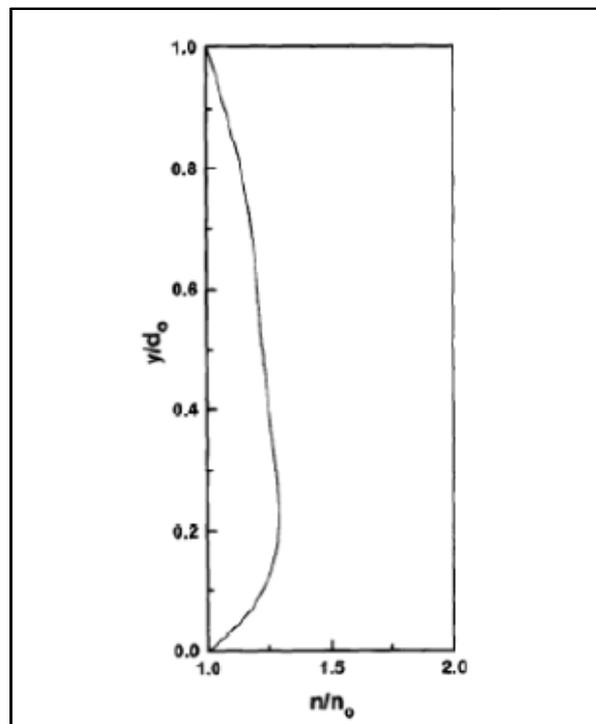


Figura 3. Curva desarrollada por Camp (1946).
 Fuente: Zaghoul, 1997.

Esto es fácilmente demostrable si la ecuación de Manning se combina con la de Darcy-Weisbach, reemplazando $S=H/l$ y $d=4R_H$. Entonces se encuentra la siguiente relación:

$$n = \frac{f^{1/2} R_H^{1/6}}{\sqrt{8g}}$$

Ecuación 11. Relación entre el n de Manning y la ecuación de Darcy-Weisbach.

La relación anterior indica la dependencia del n con el radio hidráulico y el factor f que a su vez es función del diámetro, la velocidad, la viscosidad y la rugosidad de la tubería (American Society of Civil Engineers, 2007).

Haciendo uso de la Ecuación 10, y de las relaciones geométricas relacionadas en la Tabla 1, a continuación se muestra una gráfica donde se evidencia el comportamiento irregular del n de Manning respecto a la relación de llenado de la tubería, especialmente para aquellas menores del 15%

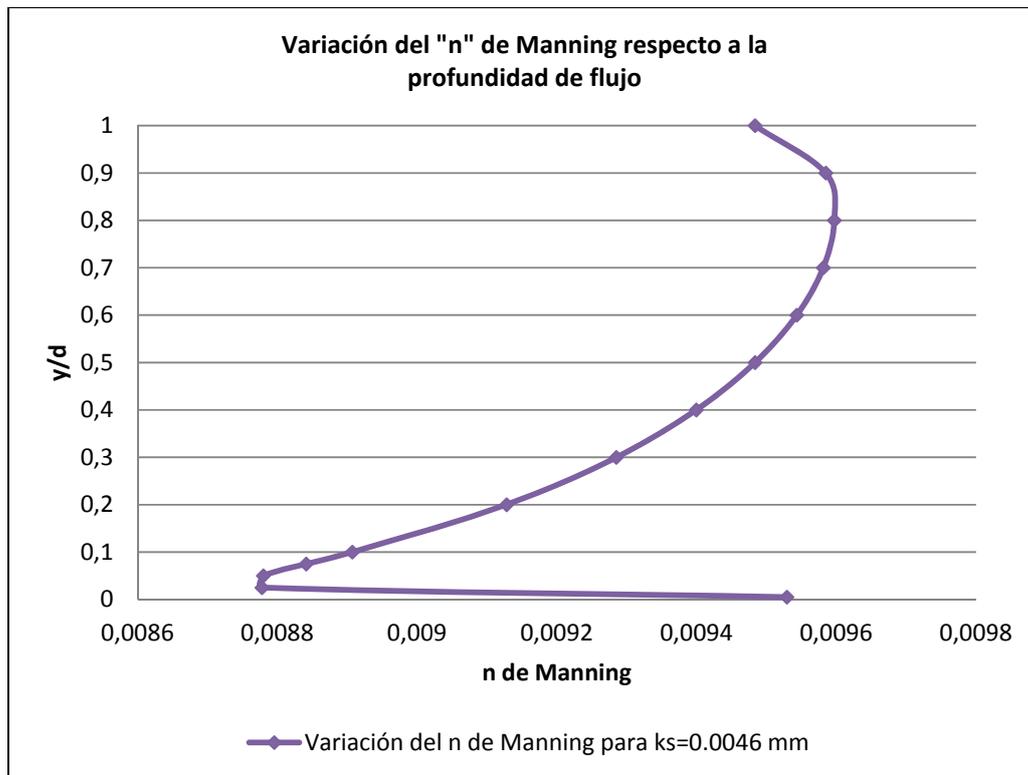


Figura 4. Variación del n de Manning con respecto a la profundidad de flujo para tubería de Acero al carbón ($k_s = 0.0045$ mm).

De acuerdo con lo anterior, el diseñador debe saber que el suponer el n como una función sólo de la rugosidad del conducto, es aceptable en casos donde es suficiente una precisión de aproximadamente 20%. Si se desea una mayor exactitud en la estimación del n de Manning (y por tanto del caudal), entonces deben considerarse otros factores (American Society of Civil Engineers, 2007).

Diversos autores han propuesto fórmulas que tienen en cuenta la variación del n con la profundidad de flujo. Dichas fórmulas hoy en día se encuentran relegadas, debido, entre otras razones, a la influencia de otras variables además de la profundidad de flujo en el coeficiente n de Manning, por lo que la fórmula pierde así la simplicidad que la caracterizaba.

En la siguiente tabla se muestran algunas ecuaciones propuestas para el cálculo del n variable.

Tabla 4. Ecuaciones propuestas para calcular el n de Manning variable.

ECUACIÓN	FORMA	R ²
Ecuación 12. Estimación del n de Manning descrita por Zaghoul (1993)	$\frac{n}{n_o} = 1 + 0.005\theta^{1.2} (2\pi - \theta)^{2.2}$	0.996
Ecuación 13. Estimación del n de Manning descrita por Wrong y Zhou (2003)	$\frac{n}{n_o} = 0.9987 + 3.4616 (h/d) - 147108 (h/d)^2 + 27.2574 (h/d)^3 + 23.4963 (h/d)^4 + 7.4909 (h/d)^5$	0.978
Ecuación 14. Estimación del n de Manning descrita por Akgiray (2005)	$\frac{n}{n_o} = 1 - 0.8627X^5 + 0.47281X^4 + 0.7626X^3 - 1.02X^2 + 0.8057X$ Donde $X = 1 - (h/d)$	0.962
Ecuación 15 Estimación del n de Manning descrita por Akgiray (2005)	$\frac{n}{n_o} = 1 + 0.18 (2\pi - \theta) \left\{ 0.1 + e^{-0.3\theta} [\text{sen}(0.38\theta)]^2 \right\}$	0.925

Fuente: Hager, Wrong y Akgiray, 2006

Wong (2006), graficó los resultados obtenidos a través de las cuatro ecuaciones comparándolas con la curva experimental de Camp. Los resultados se compararon con base en el error medio cuadrático mostrado en la tabla anterior:

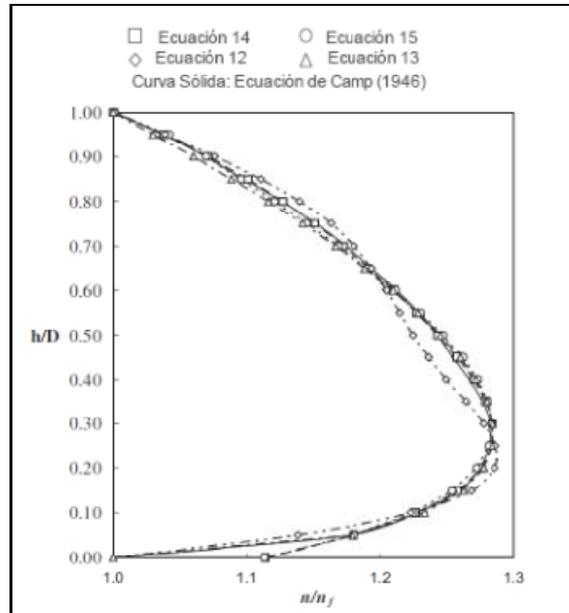


Figura 5. Comparación de la curva de Camp con las ecuaciones propuestas por diversos autores para el cálculo del n de Manning variable para flujo a superficie libre.

Fuente: Hager, Wrong y Akgiray, 2006.

2.5 APROXIMACIONES EN LA COMPARACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MANNING CON LA DE DARCY-WEISBACH

De acuerdo con la bibliografía consultada, han sido pocas las investigaciones publicadas que comparan los resultados obtenidos al utilizar las ecuaciones de Manning Vs la ecuación de Darcy-Weisbach para flujo a superficie libre. Debido a que el diseño de sistemas de alcantarillado se enfoca en la conducción y evacuación del agua residual urbana, la cual presenta una temperatura bastante uniforme a lo largo del año incluso en países con estaciones, se ha dejado de lado el estudio de los errores inducidos por el uso de la ecuación de Manning debido al cambio de la viscosidad del fluido y la mayoría de los estudios sobre la comparación de esta ecuación con la de Darcy-Weisbach se han enfocado en establecer la relación que existe entre el n de Manning y el ks para diferentes tuberías. Esto a fin de dar a los diseñadores que se muestran renuentes a la implementación de la fórmula de Darcy-Weisbach mejores herramientas de diseño para lograr disminuir los errores inducidos a la mala escogencia del n de Manning.

En 1963, Ackers, realizó pruebas de laboratorio y comparó los resultados obtenidos con ecuaciones de resistencia fluida, encontrando que las condiciones de flujo en alcantarillados nuevos son de tipo turbulento ó se encuentran en la zona de transición. Adicionalmente

encontró que la ecuación de Manning no se ajusta a los datos experimentales. En investigaciones posteriores, pero en alcantarillados con cierta edad (1964), Ackers concluye que la ecuación de Colebrook-White (en conjunto con la ecuación de Darcy-Weisbach) proporciona la mejor base de diseño al presente tiempo.

Diana Martínez Ruiz realizó recientemente un estudio en la Universidad de los Andes sobre la precisión y magnitud de errores inducidos en un diseño de redes de drenaje urbano por el uso de la ecuación de Manning Vs. la ecuación de Darcy-Weisbach. En dicho estudio, la autora compara los valores de coeficientes de rugosidad n de Manning utilizados tradicionalmente para el diseño de alcantarillados, con los calculados según la relación de la ecuación de Darcy-Weisbach, concluyendo que los valores de n de Manning tradicionalmente supuestos, especialmente para materiales como PVC y concreto, no representan las condiciones reales de rugosidad para alcantarillados, y que en general, para rugosidad menores a 0.003 m estos valores están sobreestimados desde el 10% hasta el 60%. Para rugosidades mayores a 0.003 m, los resultados de los diseños son cercanos a los encontrados con la relación de Darcy-Weisbach, para lo cual se puede establecer que la ecuación de Manning es válida para superficies bastante rugosas como los ríos.

2.6 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

Las facilidades de superficie para el tratamiento de petróleo requieren de la instalación de equipos, tanques de almacenamiento, bombas, cargaderos y descargadero de crudo y de otras sustancias como diluyentes y químicos para el proceso. Todas estas áreas se encuentran susceptibles a la generación de aguas aceitosas, debido principalmente a las siguientes actividades o condiciones de proceso:

- Mantenimientos rutinarios a los diferentes equipos.
- Derrames en situaciones de contingencia.
- Drenajes de fondo de tanques de almacenamiento y de tratamiento.

Estas aguas aceitosas deben ser captadas y conducidas hacia los sistemas de tratamiento dispuestos para tal fin, para lo cual se hace necesario el diseño de sistemas de alcantarillado al interior de las facilidades de producción de petróleo.

Los drenajes de fondo de los tanques son de especial importancia, pues condicionan la capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado, ya que, de todas las áreas generadoras de aguas aceitosas, los tanques son los que entregan un aporte de agua constante (24 horas al día). Los caudales son variables y dependen, entre otros factores de las características del proceso, el tipo de tanque (de proceso o de almacenamiento) y de la calidad del crudo extraído en el campo.

En la siguiente figura se puede ver el drenaje de fondo típico de un tanque de almacenamiento de crudo.



Figura 6. Drenaje de fondo de tanques de almacenamiento de crudo tratado.
Fuente: La autora, 2011.

2.6.1 Caracterización de las Aguas de producción de petróleo

El presente estudio se desarrollará tomando como ejemplo las características de las aguas de producción de crudo pesado (12° API).

La viscosidad de las aguas de producción de petróleo varía de acuerdo con las siguientes características:

- Temperatura.
- Porcentaje que agua en la emulsión (% BSW).

En la siguiente figura se muestra dicha variación para el agua de producción tomada como ejemplo:

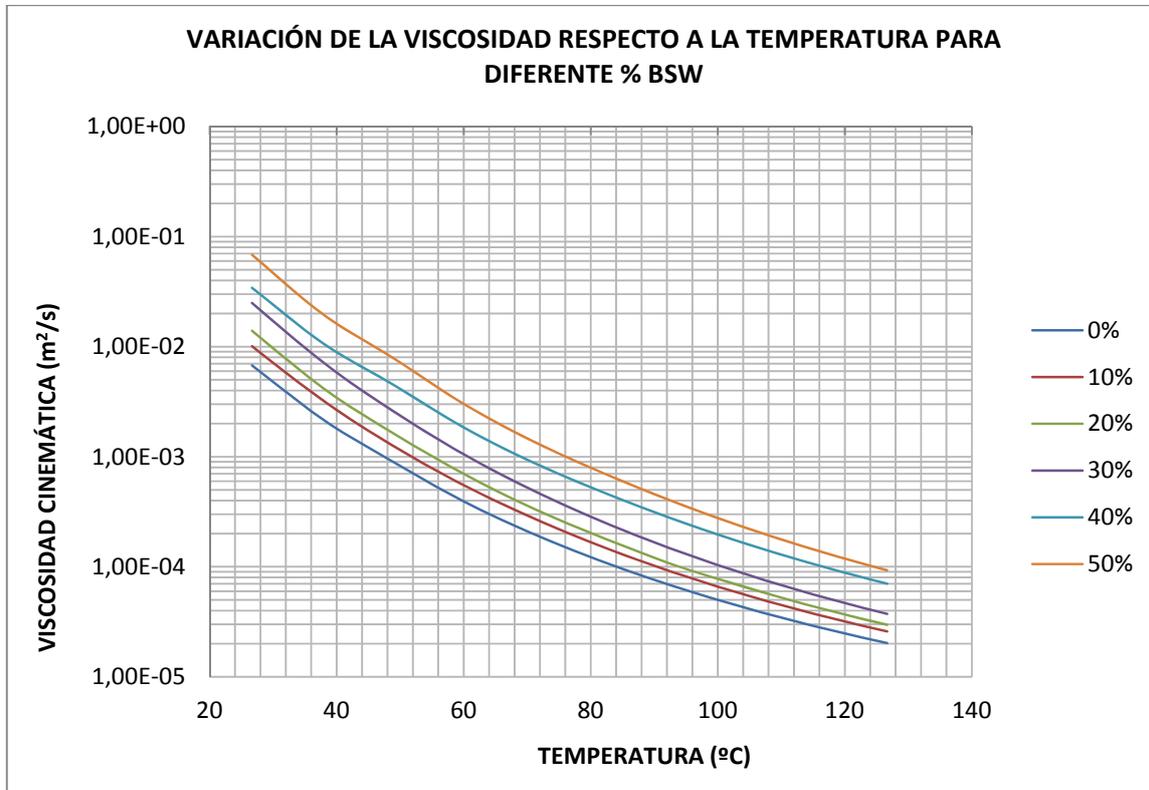


Figura 7. Variación de la viscosidad cinemática respecto a la temperatura y al % de BSW en un agua de producción de petróleo.

Fuente: La autora, 2011.

Como se puede observar, para una temperatura constante, la viscosidad aumenta respecto al contenido de agua en la emulsión. Por otro lado, la viscosidad alcanza su valor máximo en un BSW igual al 50%. Por esta razón la figura anterior solo muestra la variación de ν hasta este porcentaje.

2.6.2 Caracterización de la Tubería

- **Material:** Para la conducción de todo tipo de fluidos dentro de las instalaciones de un centro de producción de petróleo (CPF), el material predominante y casi exclusivo para las tuberías es el acero. Esto se debe a que las normas y códigos internacionales limitan el uso de los tipos de materiales de las tuberías de acuerdo con las características del fluido, del flujo y al tipo de industria donde se prevé instalar las tuberías.

De esta manera, el código ASME B31.3 establece los lineamientos para una aplicación apropiada, segura y económica para las tuberías de proceso de refinерías y plantas químicas.

El mencionado código establece que las tuberías de plástico solo pueden ser empleadas para la conducción de agua y de líquidos no inflamables donde las condiciones de presión y temperatura no superen las recomendadas por el fabricante. En todo caso en ninguna aplicación se podrá exceder la presión de 150 psi (105.6 mca) y una temperatura de 140°F (60°C) (Código ASME B31.3, 2009).

El coeficiente de rugosidad absoluta para la tubería de acero al carbón no está dado por el fabricante. Para el presente estudio se realizó una consulta bibliográfica exhaustiva, encontrando que el k_s para tubería de acero comercial es de 0.046 mm.

- **Diámetro:** En Colombia la norma técnica NTC-3470 establece los requisitos que deben cumplir las tuberías de acero galvanizadas en caliente, negras, soldadas y sin costura. Esta norma adopta de la ASTM A-53 (Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless) las siguientes características geométricas para la fabricación de tuberías de acero en el país:

Tabla 5. Diámetros de la tubería de acero al carbón según la norma NTC-3470.

Diámetro nominal		Especificación Diámetro externo		Especificación de espesor de pared		Especificación de diámetro interno	
in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
4	100	4,500	114,30	0,237	6,02	4,026	102,26
6	150	6,625	168,30	0,280	7,11	6,065	154,08
8	200	8,625	219,10	0,322	8,18	7,981	202,74
10	250	10,750	273,00	0,635	9,27	9,480	254,46
12	300	12,750	328,80	0,375	9,52	12,000	309,76
14	350	14,000	355,60	0,375	9,52	13,250	336,56
16	400	16,000	406,40	0,375	9,52	15,250	387,36

Los anteriores diámetros serán tomados como referencia para el presente estudio.

3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio, se empleó la metodología de comprobación de diseño, en la cual el objetivo es calcular el caudal que está fluyendo por una tubería parcialmente llena, conociendo las siguientes características:

- Características de la tubería: Diámetro (d), material (k_s , o “ n ” de Manning) y pendiente (S).
- Características del fluido: viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ).
- Características del flujo: Relación de llenado (y_n/d).

3.1 PROCEDIMIENTO PARA LA COMPROBACIÓN DE DISEÑO

Para la comprobación de diseño se debe definir las características anteriormente mencionadas, las cuales se presentan a continuación:

3.1.1 Diámetro: Los diámetros a evaluar se presentan en la Tabla 5.

3.1.2 Rugosidad absoluta (k_s): El material de la tubería a emplear en el estudio es acero al carbón. Se evaluaron dos rugosidades, a fin de medir el efecto del envejecimiento de la tubería sobre la capacidad de las tuberías. A continuación se presentan las rugosidades evaluadas:

- Tubería nueva en acero al carbón: $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.
- Tubería vieja en acero al carbón: $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

3.1.3 Coeficiente de rugosidad de Manning (n): Se evaluaron dos coeficientes de Manning, el primero es el valor normal recomendado por Ven T. Chow para acero estirado y soldado y mostrado en la Tabla 3 del presente documento. El segundo corresponde al calculado con la expresión descrita por Zaghluol (1993), la cual se muestra en la Ecuación 12.

- Valor normal del “ n ” de Manning recomendado por Ven T. Chow: 0.0120.
- Valor del “ n ” de Manning calculado por la expresión de Zaghluol: 0.0131.

3.1.4 Pendiente: Para cada combinación se evaluaron pendientes desde 0.1% hasta 10%; en total, para cada ciclo de evaluado, con un $\Delta S = 0.1\%$, se consideraron 100 pendientes.

3.1.5 Características del fluido: Como se mencionó con anterioridad, el fluido a evaluar corresponde a las aguas de producción de crudo pesado. Como se muestra en la Figura 7, la viscosidad de dicho fluido varía en función del % BSW y la temperatura. Para el presente estudio se tomaron tres valores de viscosidad cinemática del fluido evaluado y la viscosidad del agua a 20°C. A continuación se muestran las viscosidades y densidades incluidas en las comprobaciones de diseño:

Tabla 6. Viscosidad cinemática y densidad del fluido evaluadas.

Nº	Tipo	Temperatura (°C)	% BSW	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Densidad (kg/m ³)
I	Aceite + agua	60 °C	50 %	3.021 x 10 ⁻³	953.548
II	Aceite+ agua	82°C	50 %	7.005 x 10 ⁻⁴	939.612
III	Aceite + agua	126.7 °C	50 %	9.290 x 10 ⁻⁵	911.421
IV	Agua	20 °C	-	1.007 x 10 ⁻⁶	998.200

3.1.6 Características de flujo: Para efectos de hacer comparables los resultados, se tomó una relación de llenado yn/d del 85% para todas las comprobaciones de diseño.

Definidas las características anteriormente mencionadas, se procede a la aplicación de los programas planteados, los cuales se describen a continuación.

3.2 PROGRAMAS PLANTEADOS

A fin de lograr establecer los errores porcentuales inducidos por el uso de la ecuación del Manning debido al cambio de viscosidad del fluido, se plantearon los siguientes dos programas para la comprobación de diseño:

3.2.1 Programa 1: Comprobación de diseño aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la de Colebrook-White.

- **Descripción:** En este programa se realiza la comprobación de diseño a partir del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 6) y la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 7), y la combinación de las mismas (Ecuación 9), teniendo en cuenta las dos rugosidades absolutas y las diferentes viscosidades cinemáticas consideradas para el estudio.
- **Número de comprobaciones:** Teniendo en cuenta que para cada combinación se evaluaron 100 pendientes y 7 diámetros. Por cada diámetro y rugosidad absoluta

considerados se evaluaron 4 viscosidades diferentes, para un total de 56 combinaciones y 5600 comprobaciones de diseño.

- **Datos de entrada y tabla de resultados:** Los datos de entrada para este programa son los presentados en azul en la Tabla 7:
 - Diámetro.
 - Material y edad de la tubería.
 - Tipo de fluido a evaluar.

Las relaciones geométricas son calculadas mediante las ecuaciones mostradas en la Tabla 1, teniendo en cuenta la relación de llenado definida para el estudio.

Los resultados de los cálculos mostrados se explican a continuación.

- Columna 1: Pendiente en m/m.
- Columna 2: Pendiente en % (columna 1 * 100).
- Columna 3: Velocidad de flujo en m/s (Ver Ecuación 9).
- Columna 4: Caudal transportado por la tubería en m³/s (columna 3 * área).
- Columna 5: Caudal transportado por la tubería en L/S (columna 4 * 1000).
- Columna 6: Esfuerzo cortante en Pa ($\gamma * S * R_h$).
- Columna 7: Número de Froude – adimensional ($V / (g * D)^{0.5}$).
- Columna 8: Número de Reynolds – adimensional ($V * d / \nu$).

Es de aclarar que no es del objeto de este estudio verificar las restricciones de auto limpieza o sobrecarga en la tubería, por lo tanto, el esfuerzo cortante, la velocidad de flujo y el número de Froude se calcularon más no se chequearon.

Una vista del Programa 1 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7. Vista del programa de comprobación de diseño – Darcy-Weisbach y Colebrook-White.

VARIABLES DE ENTRADA	
Tubería	
Material	Tubería vieja en acero
Rugosidad (m)	2,90E-03
Diametro nominal	4 in
Diametro real interno (m)	0,1023
Fluido	
Características	OIL 82,2°C y 50% BSW
Viscosidad cinematica (m ² /s)	7,01E-04
densidad (Kg/m ³)	939,6124
Peso específico	9217,5973

RELACIONES GEOMÉTRICAS						
θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R _H (m)	D (m)	Y _n /d	Y _n (m)
4,6924	0,0074	0,2399	0,0310	0,1019	0,8500	0,0869

ADVERTENCIAS

	El esfuerzo cortante es menor a 2 Pa (mínimo para alcantarillados de aguas residuales domésticas de acuerdo con el RAS 2011)
	Puede haber sobrecarga ebn la tubería por que el número de froude se encuentra entre 0,7 y 1,5, teniendo en cuenta que Y _n /d = 0,85

PENDIENTE		VELOCIDAD		CAUDAL		τ	Fr	Re
m/m	%	m/s	m ³ /s	LPS	Pa	-	-	
0,001	0,1	0,0525	0,0004	0,3907	0,2859	0,05252	7,67	
0,002	0,2	0,0947	0,0007	0,7048	0,5717	0,09475	13,83	
0,003	0,3	0,1306	0,0010	0,9714	0,8576	0,13060	19,06	
0,004	0,4	0,1626	0,0012	1,2098	1,1434	0,16264	23,74	
0,005	0,5	0,1920	0,0014	1,4286	1,4293	0,19206	28,03	
0,006	0,6	0,2194	0,0016	1,6327	1,7151	0,21949	32,03	
0,007	0,7	0,2453	0,0018	1,8251	2,0010	0,24536	35,81	
0,008	0,8	0,2699	0,0020	2,0079	2,2869	0,26993	39,39	
0,009	0,9	0,2933	0,0022	2,1826	2,5727	0,29342	42,82	
0,01	1	0,3159	0,0024	2,3505	2,8586	0,31598	46,12	
0,011	1,1	0,3376	0,0025	2,5122	3,1444	0,33773	49,29	
0,012	1,2	0,3587	0,0027	2,6686	3,4303	0,35876	52,36	
0,013	1,3	0,3790	0,0028	2,8203	3,7161	0,37914	55,33	
0,014	1,4	0,3989	0,0030	2,9677	4,0020	0,39896	58,23	
0,015	1,5	0,4181	0,0031	3,1111	4,2879	0,41824	61,04	
0,016	1,6	0,4369	0,0033	3,2510	4,5737	0,43705	63,78	
0,017	1,7	0,4553	0,0034	3,3877	4,8596	0,45542	66,47	
0,018	1,8	0,4733	0,0035	3,5213	5,1454	0,47338	69,09	
0,019	1,9	0,4908	0,0037	3,6521	5,4313	0,49097	71,65	
0,02	2	0,5081	0,0038	3,7803	5,7171	0,50820	74,17	
0,021	2,1	0,5250	0,0039	3,9061	6,0030	0,52511	76,64	
0,022	2,2	0,5416	0,0040	4,0296	6,2889	0,54171	79,06	
0,023	2,3	0,5579	0,0042	4,1509	6,5747	0,55802	81,44	
0,024	2,4	0,5739	0,0043	4,2702	6,8606	0,57406	83,78	
0,025	2,5	0,5897	0,0044	4,3876	7,1464	0,58985	86,08	
0,026	2,6	0,6052	0,0045	4,5032	7,4323	0,60538	88,35	
0,027	2,7	0,6205	0,0046	4,6171	7,7181	0,62069	90,59	
0,028	2,8	0,6356	0,0047	4,7293	8,0040	0,63578	92,79	
0,029	2,9	0,6505	0,0048	4,8400	8,2899	0,65066	94,96	
0,03	3	0,6652	0,0049	4,9492	8,5757	0,66534	97,10	
0,031	3,1	0,6796	0,0051	5,0569	8,8616	0,67982	99,22	
0,032	3,2	0,6939	0,0052	5,1633	9,1474	0,69413	101,30	
0,033	3,3	0,7081	0,0053	5,2684	9,4333	0,70826	103,37	

3.2.2 Programa 2: Comprobación de diseño aplicando la ecuación de Manning con el coeficiente de rugosidad sugerido por Ven. T. Chow (n_{VTC}) y el coeficiente de rugosidad calculado (n_{CAL})

- ***Descripción:*** En el Programa 2 se realizó la comprobación de diseño empleando la ecuación de Manning (Ecuación 10), con el valor normal del “n” recomendado por Ven T. Chow (0.012). y con el valor del “n” de Manning calculado por la expresión de Zaghoul (0.0131).
- ***Número de comprobaciones:*** Teniendo en cuenta que para cada combinación se evaluaron 100 pendientes y 7 diámetros, y que la ecuación de Manning no considera la viscosidad dentro de la formulación, se tiene que por cada diámetro se llevan a cabo 100 comprobaciones de diseño, obteniendo 700 en total para cada “n” de Manning evaluado.
- ***Datos de entrada y tabla de resultados:*** Los datos de entrada para este programa son los presentados en azul en la Tabla 8:
 - Diámetro.
 - Coeficiente de rugosidad de Manning.

Las relaciones geométricas son calculadas mediante las ecuaciones mostradas en la Tabla 1, con la relación de llenado definida para el estudio.

Los resultados de los cálculos mostrados se explican a continuación.

- Columna 1: Pendiente en m/m.
- Columna 2: Pendiente en % (columna 1 * 100).
- Columna 3: Velocidad de flujo en m/s (Ver Ecuación 9).
- Columna 4: Caudal transportado por la tubería en m³/s (columna 3 * área).
- Columna 5: Caudal transportado por la tubería en L/S (columna 4 * 1000).

Una vista del Programa 2 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Vista del programa de comprobación de diseño – Ecuación de Manning

VARIABLES DE ENTRADA	
Tubería	
"n" de Manning	0,0131
Diametro nominal	8 in
Diametro real interno (m)	0,2027
Fluido	
Características	H2O a 20°C
Viscosidad cinematica (m ² /s)	1,007E-06
densidad (Kg/m ³)	998,2000
Peso específico	9792,3420

* corregido con la ecuación descrita por Zaghoul (1993)

RELACIONES GEOMÉTRICAS						
θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R _H (m)	D (m)	Y _n /d	Y _n (m)
4,6924	0,0292	0,4757	0,0615	0,2020	0,8500	0,1723

PENDIENTE		VELOCIDAD		CAUDAL	
m/m	%	m/s	m ³ /s	LPS	
0,001	0,1	0,3770	0,0110	11,0272	
0,002	0,2	0,5332	0,0156	15,5949	
0,003	0,3	0,6531	0,0191	19,0997	
0,004	0,4	0,7541	0,0221	22,0545	
0,005	0,5	0,8431	0,0247	24,6576	
0,006	0,6	0,9236	0,0270	27,0111	
0,007	0,7	0,9976	0,0292	29,1753	
0,008	0,8	1,0665	0,0312	31,1897	
0,009	0,9	1,1311	0,0331	33,0817	
0,01	1	1,1923	0,0349	34,8712	
0,011	1,1	1,2505	0,0366	36,5732	
0,012	1,2	1,3061	0,0382	38,1994	
0,013	1,3	1,3595	0,0398	39,7592	
0,014	1,4	1,4108	0,0413	41,2601	
0,015	1,5	1,4603	0,0427	42,7083	
0,016	1,6	1,5082	0,0441	44,1089	
0,017	1,7	1,5546	0,0455	45,4664	
0,018	1,8	1,5997	0,0468	46,7846	
0,019	1,9	1,6435	0,0481	48,0666	
0,02	2	1,6862	0,0493	49,3153	
0,021	2,1	1,7279	0,0505	50,5331	
0,022	2,2	1,7685	0,0517	51,7223	
0,023	2,3	1,8083	0,0529	52,8847	
0,024	2,4	1,8472	0,0540	54,0222	
0,025	2,5	1,8852	0,0551	55,1361	
0,026	2,6	1,9226	0,0562	56,2280	
0,027	2,7	1,9592	0,0573	57,2992	
0,028	2,8	1,9952	0,0584	58,3506	
0,029	2,9	2,0305	0,0594	59,3834	
0,03	3	2,0652	0,0604	60,3986	
0,031	3,1	2,0993	0,0614	61,3970	

3.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para presentar los resultados para su posterior análisis se optó por realizar los siguientes cálculos, los cuales se representan gráficamente y se describen a continuación:

- **Gráficas Tipo 1:** Variación del caudal calculado con la ecuación de Darcy-Weisbach ($Q_{DW} (v)$) y el caudal calculado con la ecuación de Manning con el valor de “n” recomendado por Ven T. Chow ($Q_M (n_{VTC})$) y el valor de “n” calculado ($Q_M (n_{CAL})$).

Con esta gráfica se busca mostrar los caudales calculados con las dos ecuaciones objeto de comparación del presente estudio. En esta se presentan los caudales resultantes de aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Manning, como función de la pendiente de la tubería, para un diámetro y una rugosidad absoluta constante.

- **Gráficas Tipo 2:** Error Porcentual del caudal calculado con la ecuación de Manning Vs. el caudal calculado con la ecuación de Darcy-Weisbach (d y ks constante).

Con esta gráfica se busca mostrar el error porcentual inducido por el uso de la ecuación de Manning cuando se emplea cada uno de los valores de “n” evaluados Vs. el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach con diferentes viscosidades. En esta se presenta el mencionado error en función de la pendiente de la tubería, para un diámetro y una rugosidad absoluta constante.

El porcentaje de error se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Porcentaje de error } (E_Q) = \frac{Q_M - Q_{DW}}{Q_{DW}} * 100$$

Ecuación 16. Porcentaje de error del Caudal cuando se emplea para su cálculo la ecuación de Manning y la ecuación de Darcy-Weisbach.

- **Gráfica Tipo 3:** Error Porcentual del Caudal calculado con la ecuación de Manning Vs. el caudal calculado con la ecuación de Darcy-Weisbach (ks y v constantes).

Con esta gráfica se busca mostrar el porcentaje de error inducido por el uso de la ecuación de Manning cuando se emplea cada uno de los valores de “n” evaluados Vs. el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach, cuando la rugosidad absoluta de la tubería y la viscosidad del fluido permanecen constantes. Por motivos de visualización solo se muestran tres de los diámetros evaluados (4, 8 y 16 in). En el anexo se puede consultar las gráficas para todos los resultados.

El porcentaje de error se calcula por medio de la expresión descrita en la Ecuación 16.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 VARIACIÓN DEL $Q_{DW} (v)$, $Q_M (n_{VTC})$ Y $Q_M (n_{CAL})$: CAUDALES RESULTANTES Y PORCENTAJE DE ERROR ($k_s = 4.6 \times 10^{-5} m$)

Teniendo en cuenta que el objeto del presente estudio es encontrar los errores inducidos por el uso de la ecuación de Manning cuando el fluido transportado a través del sistema de alcantarillados presenta diferentes viscosidades, para representar la variación del caudal calculado con la ecuación de Darcy-Weisbach frente al caudal calculado con la ecuación de Manning con el valor de “ n_{VTC} ” y el valor de “ n_{CAL} ”, se va a hacer uso de las gráficas tipo 1 y 2 descritas en el capítulo anterior.

Dado el volumen de información resultante, en las tablas de datos se presentarán únicamente los caudales y porcentajes de error para las siguientes pendientes evaluadas: 0.1%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10%.

A continuación se presentan los resultados para cada diámetro evaluado con la rugosidad absoluta de la tubería nueva de acero al carbón ($4.6 \times 10^{-5} m$).

4.1.1 Diámetro = 4” y $k_s = 4.6 \times 10^{-5} m$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 4” y la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} m$.

Tabla 9. Resumen de la variación de $Q_{DW} (v)$, $Q_M (n_{VTC})$ y $Q_M (n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 4$ ” y $k_s = 4.6 \times 10^{-5} m$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s)$	-0,0684	0,0595	1,8294	3,2858	4,5246	5,6345	6,6550
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s)$	0,3975	0,7184	3,9118	6,2297	8,1293	9,7959	11,3067
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} m^2/s)$	1,0408	1,6277	6,7775	10,2740	13,0747	15,4988	17,6752
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} m^2/s)$	2,4151	3,5366	12,1982	17,5561	21,6873	25,1782	28,2581
	$Q_M (n_{VTC})$	1,9354	2,7371	8,6554	12,2406	14,9916	17,3109	19,3541
	$Q_M (n_{CAL})$	1,7776	2,5140	7,9498	11,2428	13,7695	15,8997	17,7764
$Q_{DW}-Q_M (n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-	4498,73%	373,12%	272,54%	231,34%	207,23%	190,82%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	386,85%	281,00%	121,26%	96,49%	84,42%	76,72%	71,17%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	85,95%	68,15%	27,71%	19,14%	14,66%	11,69%	9,50%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-19,86%	-22,61%	-29,04%	-30,28%	-30,87%	-31,25%	-31,51%
$Q_{DW}-Q_M (n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-2698,82%	4123,84%	334,55%	242,17%	204,32%	182,18%	167,11%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	347,16%	249,94%	103,22%	80,47%	69,38%	62,31%	57,22%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	70,79%	54,45%	17,30%	9,43%	5,31%	2,59%	0,57%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-26,39%	-28,92%	-34,83%	-35,96%	-36,51%	-36,85%	-37,09%

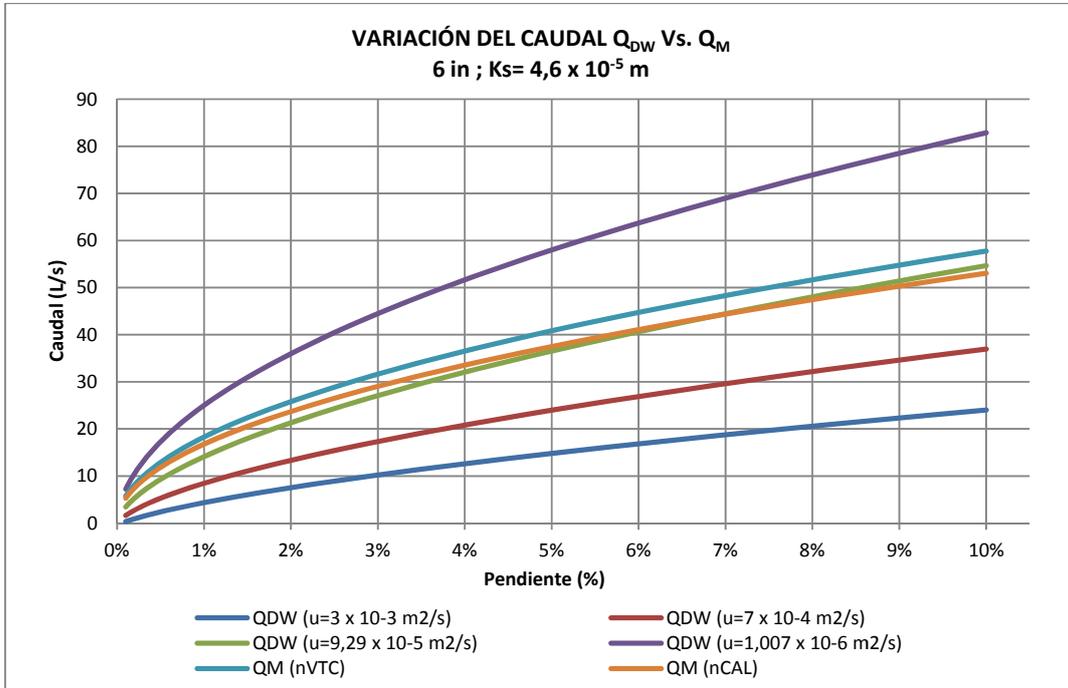


Figura 8. Variación de Q_{DW} (v), Q_M (nVTC) y Q_M (nCAL), cuando $d = 4''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

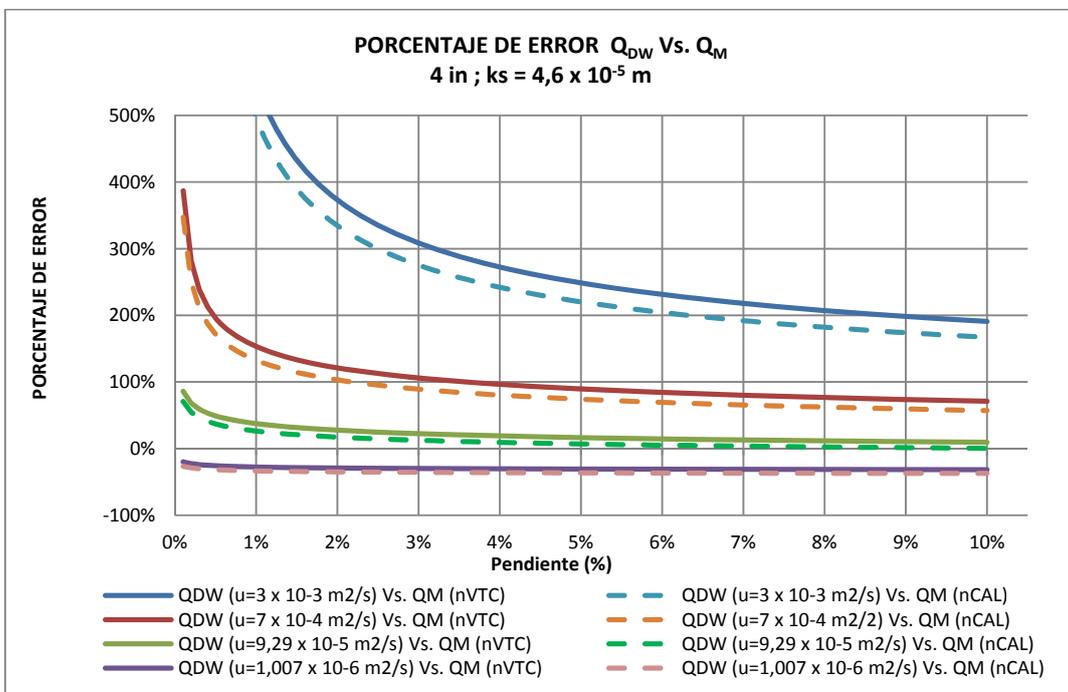


Figura 9. Porcentaje de error de Q_{DW} (v) Vs. Q_M (nVTC) y Q_{DW} (v) Vs. Q_M (nCAL), cuando $d = 4''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

En la tabla anterior se puede observar que para la mayor viscosidad ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) y la menor pendiente considerada (0.1%) el caudal resulta ser negativo, por lo que para esa combinación en particular el análisis se llevará a cabo con los resultados obtenidos para la pendiente de 0.2%.

Para un diámetro de 4" y un $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.2\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 0.06 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.2\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 3.54 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 6.65 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 28.26 \text{ L/s}$.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 98.3% y un 76.4%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Por otro lado, los caudales calculados con el valor de " n_{VTC} " y el valor de " n_{CAL} " varían entre los obtenidos para $\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, encontrando que para pendientes mayores al 9.5% los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) son menores al 10%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.97% y 0.57%) se obtienen para pendientes mayores al 3.8%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para pendientes mayores al 9.5%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 4498.73% y 190.82%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -19.89% y -31.51%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 11.62%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.39% y -37.09%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 10.7%.

4.1.2 Diámetro = 6" y $ks = 4.6 \times 10^{-5} m$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 6" y la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} m$.

Tabla 10. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 6''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} m$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s)$	0,3557	0,9385	7,5413	12,6116	16,8403	20,5876	24,0081
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s)$	1,6541	2,7746	13,3435	20,8136	26,8824	32,1802	36,9659
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} m^2/s)$	3,4464	5,3077	21,3204	32,0661	40,6371	48,0369	54,6689
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} m^2/s)$	7,2380	10,5574	35,9924	51,6552	63,7169	73,9026	82,8853
	$Q_M (n_{VTC})$	5,7750	8,1670	25,8264	36,5240	44,7326	51,6527	57,7495
	$Q_M (n_{CAL})$	5,3042	7,5012	23,7210	33,5465	41,0860	47,4420	53,0418
$Q_{DW} - Q_M (n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	1523,39%	770,21%	242,46%	189,61%	165,63%	150,89%	140,54%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	249,12%	194,35%	93,55%	75,48%	66,40%	60,51%	56,22%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	67,57%	53,87%	21,13%	13,90%	10,08%	7,53%	5,64%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-20,21%	-22,64%	-28,25%	-29,29%	-29,79%	-30,11%	-30,33%
$Q_{DW} - Q_M (n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	1391,05%	699,27%	214,55%	166,00%	143,97%	130,44%	120,93%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	220,66%	170,36%	77,77%	61,18%	52,84%	47,43%	43,49%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	53,91%	41,33%	11,26%	4,62%	1,10%	-1,24%	-2,98%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-26,72%	-28,95%	-34,09%	-35,06%	-35,52%	-35,80%	-36,01%

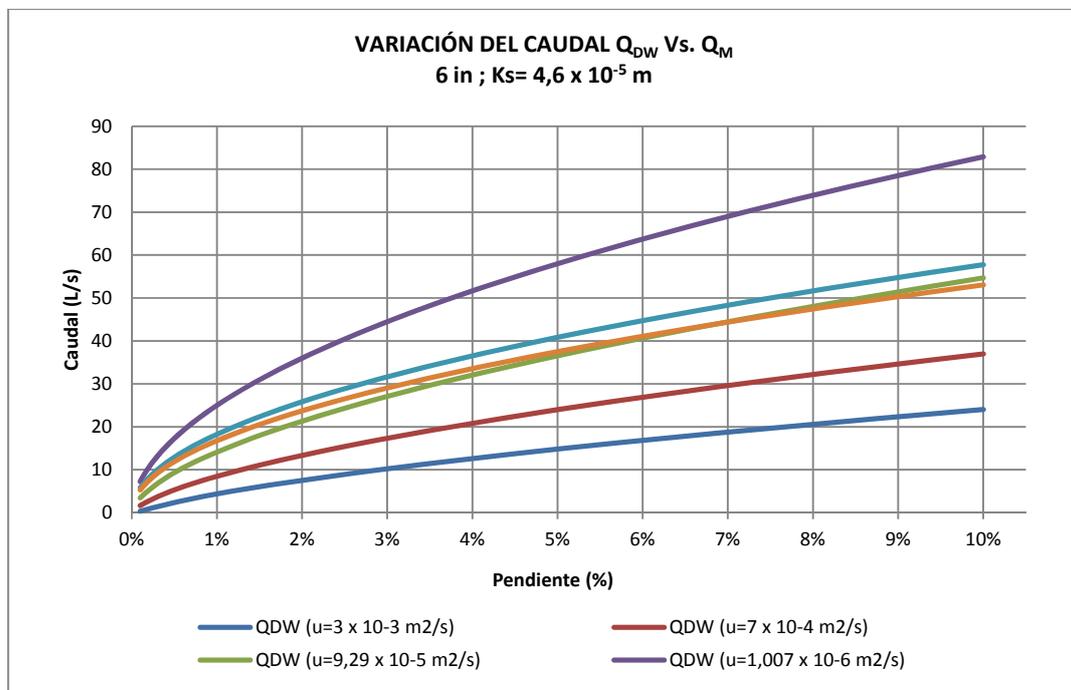


Figura 10. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 6''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} m$.

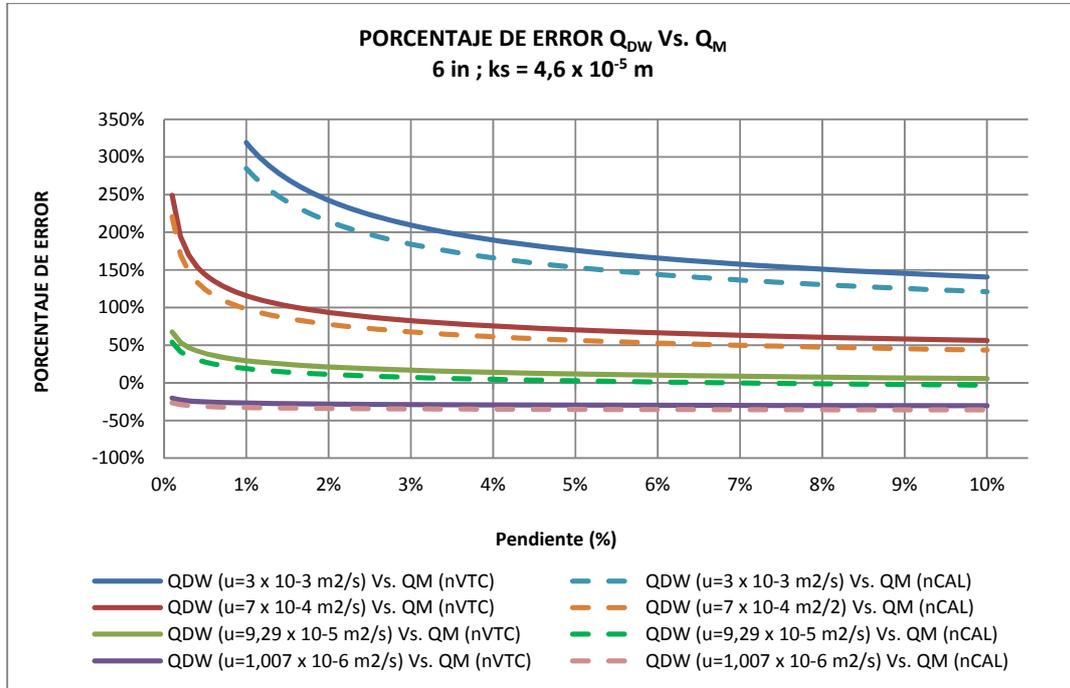


Figura 11. Porcentaje de error de $Q_{DW} (v)$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$ y $Q_{DW} (v)$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$, cuando $d = 6''$ y $k_s = 4,6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Para un diámetro de 6'' y un $k_s = 4,6 \times 10^{-5} \text{ m}$, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0,1\%$ y $v = 3,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 0,36 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0,1\%$ y $v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 7,24 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 24,00 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 82,88 \text{ L/s}$.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 95.1% y un 71.0%, como función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de "n_{VTC}" varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $v = 9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $v = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, encontrando que para pendientes mayores al 6.1% los porcentajes de error cuando se compara $Q_{DW} (9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$ son menores al 10%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.85% y -2.98%) se obtienen para pendientes mayores al 2.3%, cuando se compara los caudales de $Q_{DW} (9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$.

Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 6.1% y 7.7%. Para la pendiente de 6.9% los caudales prácticamente se igualan; para pendientes menores el caudal $Q_M (n_{CAL})$, está sobre estimado hasta en un 53.9% frente al caudal Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 2.98%

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ variando estos entre 1523.39% y 140.54%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre -20.21% y -30.33%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 10.12%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.39% y -36.01%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 9.62%.

4.1.3 Diámetro = 8" y $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 8" y la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Tabla 11. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 8''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	1,4329	2,8912	18,2255	29,6402	39,0705	47,3828	54,9423
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	4,0115	6,5375	29,7469	45,9261	59,0093	70,3991	80,6683
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	7,5702	11,5669	45,5749	68,2454	86,2841	101,8346	115,7567
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	15,0426	21,8881	74,0937	106,1586	130,8347	151,6657	170,0327
	$Q_M (n_{VTC})$	12,0060	16,9790	53,6923	75,9323	92,9977	107,3845	120,0595
	$Q_M (n_{CAL})$	11,0272	15,5949	49,3153	69,7423	85,4165	98,6305	110,2723
$Q_{DW} - Q_M (n_{VTC}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$	737,87%	487,26%	194,60%	156,18%	138,03%	126,63%	118,52%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$	199,29%	159,72%	80,50%	65,34%	57,60%	52,54%	48,83%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$	58,60%	46,79%	17,81%	11,26%	7,78%	5,45%	3,72%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{VTC})$	-20,19%	-22,43%	-27,53%	-28,47%	-28,92%	-29,20%	-29,39%
$Q_{DW} - Q_M (n_{CAL}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$	669,57%	439,39%	170,58%	135,30%	118,62%	108,16%	100,71%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$	174,89%	138,55%	65,78%	51,86%	44,75%	40,10%	36,70%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$	45,67%	34,82%	8,21%	2,19%	-1,01%	-3,15%	-4,74%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M (n_{CAL})$	-26,69%	-28,75%	-33,44%	-34,30%	-34,71%	-34,97%	-35,15%

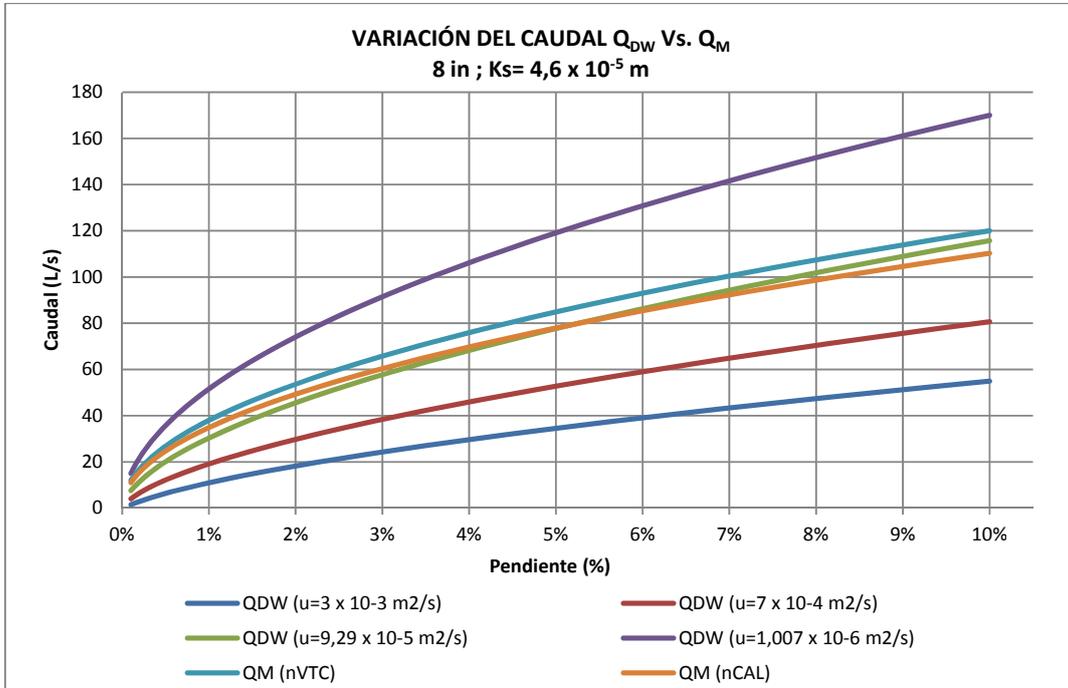


Figura 12. Variación de $Q_{DW}(u)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 8''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

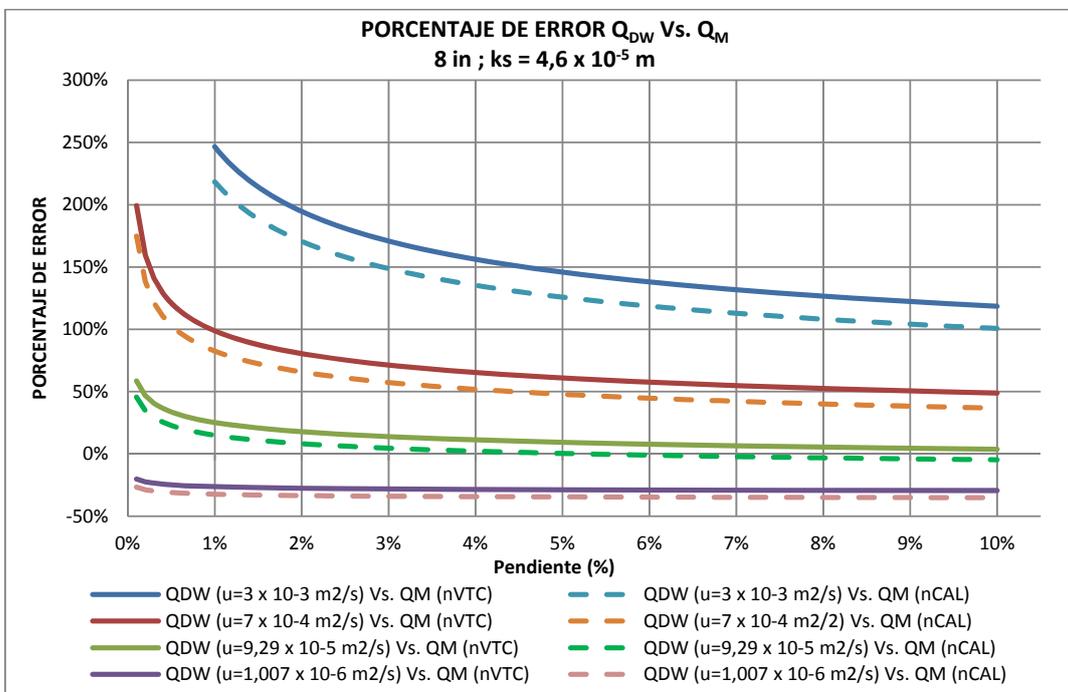


Figura 13. Porcentaje de error de $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 8''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

Para un diámetro de 8" y un $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 1.43$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 15.05$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 54.94$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 170.04$ L/s.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el ks evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 90.5% y un 67.7%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de "n_{VTC}" varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $v = 9.29 \times 10^{-5}$ m²/s y $v = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, encontrando que para pendientes mayores al 4.6% los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}) son menores al 10%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}), el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre -26.69% y 35.15%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.73% y -4.74%) se obtienen para pendientes mayores al 1.7%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 4.7% y 6%. Para la pendiente de 5.3% los caudales prácticamente se igualan, y para pendientes menores el caudal Q_M (n_{CAL}), está sobre estimado hasta en un 45% frente al caudal Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 4.7%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} (3.02×10^{-3} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 737.87% y 118.52%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -20.19% y -29.39%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 9.2%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.69% y -35.15%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 8.46%.

4.1.4 Diámetro = 10" y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 10" y la rugosidad absoluta de 4.6×10^{-5} m.

Tabla 12. Resumen de la variación de $Q_{DW}(\nu)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 10''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW}(\nu = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	3,5902	6,6034	36,9105	59,0208	77,1714	93,1122	107,5730
	$Q_{DW}(\nu = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	8,1408	13,0381	57,2409	87,7569	112,3514	133,7205	152,9606
	$Q_{DW}(\nu = 9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	14,4200	21,9118	85,1509	127,0995	160,4167	189,1060	214,7703
	$Q_{DW}(\nu = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	27,5150	39,9603	134,5311	192,5068	237,1017	274,7389	307,9196
	$Q_M(n_{VTC})$	22,0061	31,1214	98,4144	139,1790	170,4587	196,8288	220,0613
	$Q_M(n_{CAL})$	20,2122	28,5843	90,3916	127,8331	156,5629	180,7833	202,1218
$Q_{DW} - Q_M(n_{VTC}) / Q_{DW}(\%)$	$Q_{DW}(\nu = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	512,95%	371,29%	166,63%	135,81%	120,88%	111,39%	104,57%
	$Q_{DW}(\nu = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	170,32%	138,70%	71,93%	58,60%	51,72%	47,19%	43,87%
	$Q_{DW}(\nu = 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	52,61%	42,03%	15,58%	9,50%	6,26%	4,08%	2,46%
	$Q_{DW}(\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	-20,02%	-22,12%	-26,85%	-27,70%	-28,11%	-28,36%	-28,53%
$Q_{DW} - Q_M(n_{CAL}) / Q_{DW}(\%)$	$Q_{DW}(\nu = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	462,98%	332,87%	144,89%	116,59%	102,88%	94,16%	87,89%
	$Q_{DW}(\nu = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	148,28%	119,24%	57,91%	45,67%	39,35%	35,19%	32,14%
	$Q_{DW}(\nu = 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	40,17%	30,45%	6,15%	0,58%	-2,40%	-4,40%	-5,89%
	$Q_{DW}(\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	-26,54%	-28,47%	-32,81%	-33,60%	-33,97%	-34,20%	-34,36%

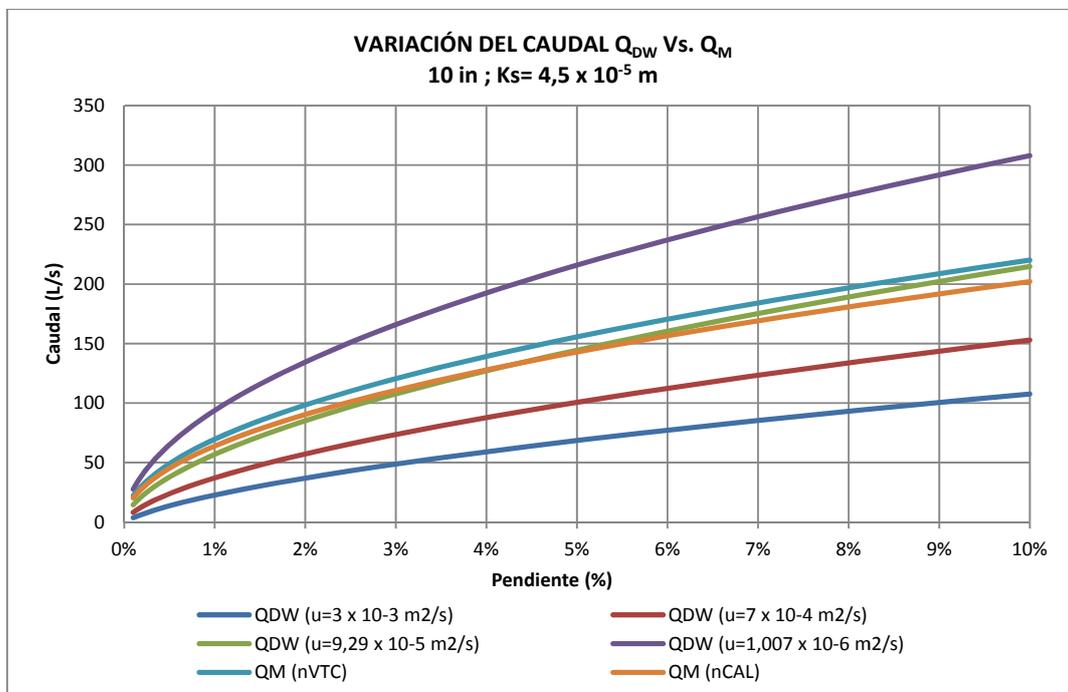


Figura 14. Variación de $Q_{DW}(\nu)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 10''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

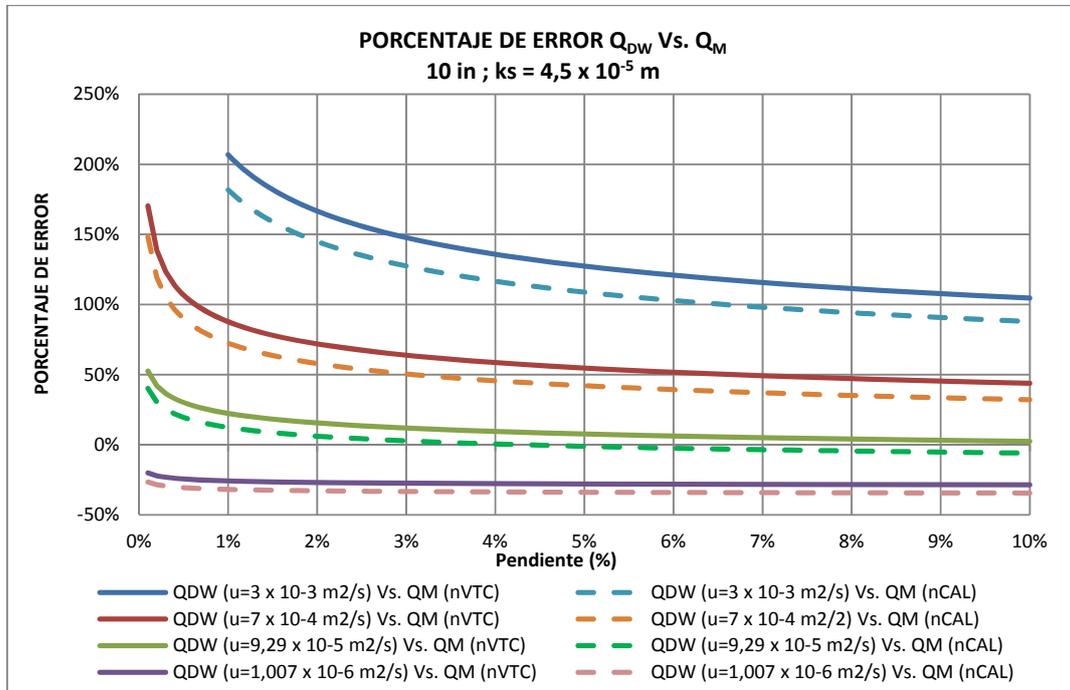


Figura 15. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 10''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$

Para un diámetro de 10'' y un $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 3.59 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 27.52 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 107.57 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 307.92 \text{ L/s}$.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 86.9% y un 65.1%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de "n_{VTC}" varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, encontrando que para pendientes mayores al 3.8% los porcentajes de error cuando se compara $Q_{DW}(9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ son menores al 10%.

Cuando se compara $Q_{DW}(1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre -26.54% y 34.36%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.97% y -5.89%) se obtienen para pendientes mayores al 1.3%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 3.8% y 4.9%. Para la pendiente de 4.3% los caudales prácticamente se igualan, y para pendientes menores el caudal Q_M (n_{CAL}), está sobrestimado hasta en un 40.2% frente al caudal Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 5.9%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 512.95% y 104.57%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -20.02% y -28.53%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 8.51%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.54% y -34.36%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.82%.

4.1.5 Diámetro = 12" y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 12" y la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Tabla 13. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 12''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

		PENDIENTE (%)							
		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000	
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	7,3718	12,9204	67,0638	105,9947	137,8043	165,6657	190,8932	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	14,8117	23,4407	100,2993	152,9690	195,3099	232,0422	265,0794	
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	25,0763	37,9453	145,8947	217,2204	273,7867	322,4518	365,9571	
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	46,3450	67,2020	225,2349	321,9729	396,3571	459,1250	514,4552	
	$Q_M (n_{VTC})$	37,1785	52,5784	166,2675	235,1378	287,9838	332,5350	371,7855	
	$Q_M (n_{CAL})$	34,1477	48,2922	152,7134	215,9693	264,5073	305,4267	341,4775	
$Q_{DW}(n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	404,33%	306,94%	147,92%	121,84%	108,98%	100,73%	94,76%	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	151,01%	124,30%	65,77%	53,72%	47,45%	43,31%	40,25%	
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	48,26%	38,56%	13,96%	8,25%	5,19%	3,13%	1,59%	
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-19,78%	-21,76%	-26,18%	-26,97%	-27,34%	-27,57%	-27,73%	
$Q_{DW}(n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	363,22%	273,77%	127,71%	103,75%	91,94%	84,36%	78,88%	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	130,55%	106,02%	52,26%	41,18%	35,43%	31,63%	28,82%	
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	36,18%	27,27%	4,67%	-0,58%	-3,39%	-5,28%	-6,69%	
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-26,32%	-28,14%	-32,20%	-32,92%	-33,27%	-33,48%	-33,62%	

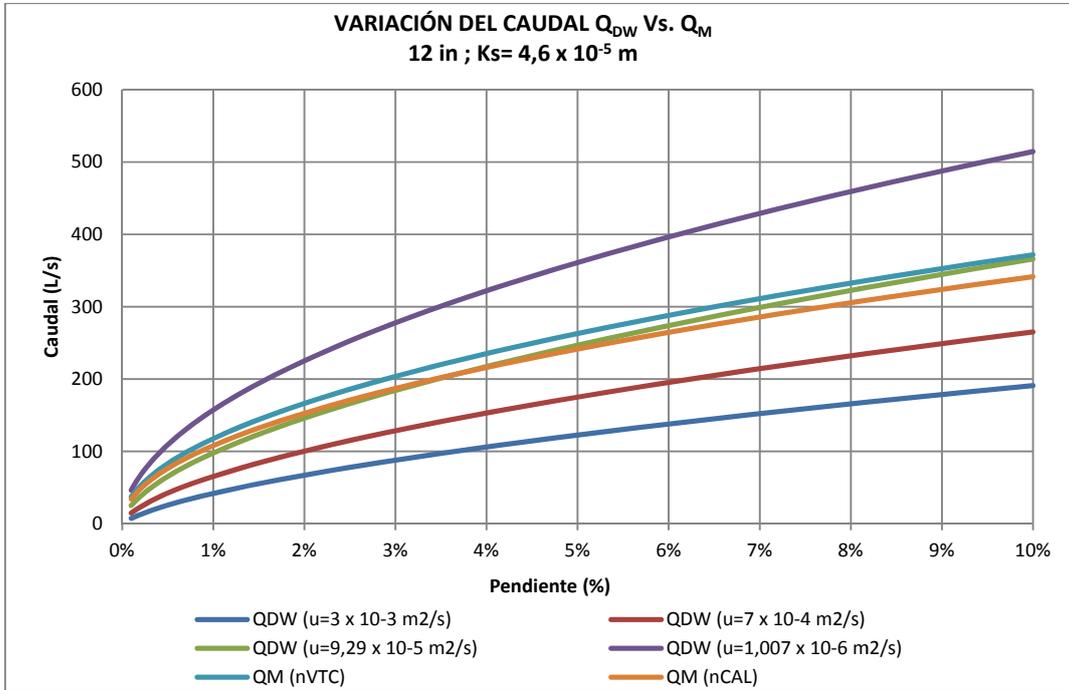


Figura 16. Variación de Q_{DW} (v), Q_M (nVTC) y Q_M (nCAL), cuando $d = 12''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

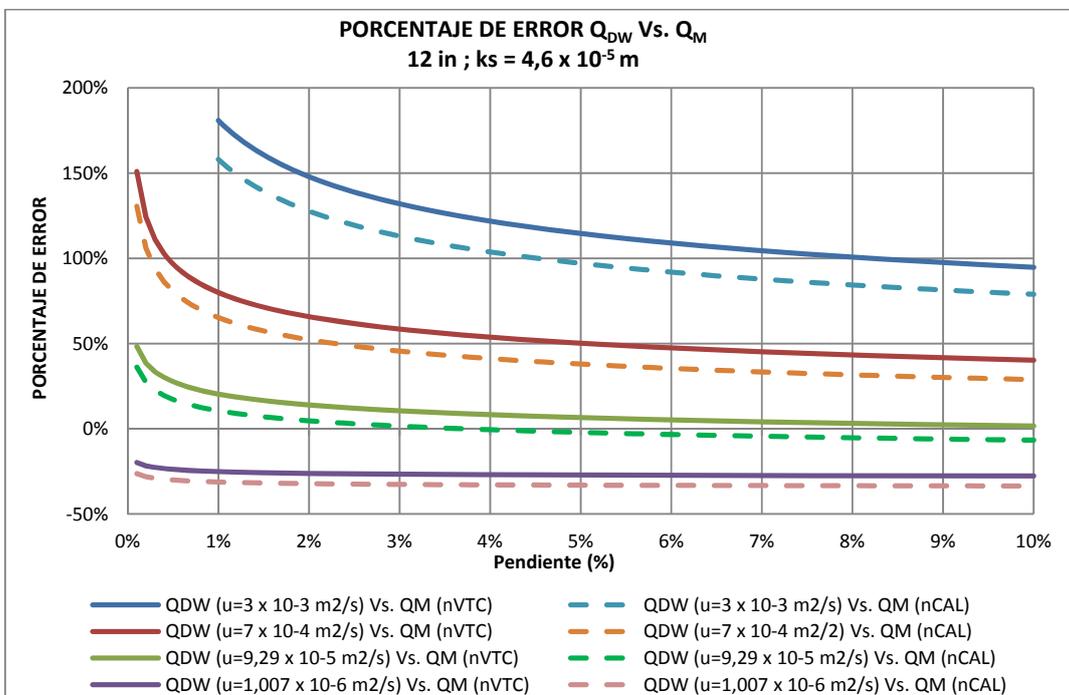


Figura 17. Porcentaje de error de Q_{DW} (v) Vs. Q_M (nVTC) y Q_{DW} (v) Vs. Q_M (nCAL), cuando $d = 12''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

Para un diámetro de 12" y un $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 7.37$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 46.35$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 190.89$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 514.45$ L/s.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 84.1% y un 62.9%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de " n_{VTC} " varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $\nu = 9.29 \times 10^{-5}$ m²/s y $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s, encontrando que para pendientes mayores al 3.2% los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}) son menores al 10%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}), el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre -26.32% y 33.62%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.70% y -6.69%) se obtienen para pendientes mayores al 1.1%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 3.3% y 4.2%. Para la pendiente de 3.7% los caudales prácticamente se igualan, y para pendientes menores el caudal Q_M (n_{CAL}), está sobrestimado hasta en un 36.2% frente al caudal Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 6.7%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} (3.02×10^{-3} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 404.33% y 94.76%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -19.78% y -27.73%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.95%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.32% y -33.62%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.3%.

4.1.6 Diámetro = 14" y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 14" y la rugosidad absoluta de 4.6×10^{-5} m.

Tabla 14. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 14''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	9,8510	17,0018	86,0110	135,3606	175,6111	210,8292	242,6950
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	19,0060	29,9470	126,9059	193,1591	246,3661	292,4977	333,9712
	$Q_{DW}(v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	31,6359	47,7933	182,9919	272,1816	342,8736	403,6691	458,0044
	$Q_{DW}(v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	57,7305	83,6578	279,8808	399,9272	492,2212	570,0969	638,7419
	$Q_M(n_{VTC})$	46,3865	65,6004	207,4467	293,3739	359,3082	414,8934	463,8649
	$Q_M(n_{CAL})$	42,6051	60,2526	190,5356	269,4580	330,0173	381,0712	426,0506
$Q_{DW}-Q_M(n_{VTC}) / Q_{DW}(\%)$	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	370,88%	285,84%	141,19%	116,74%	104,60%	96,79%	91,13%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	144,06%	119,05%	63,47%	51,88%	45,84%	41,85%	38,89%
	$Q_{DW}(v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	46,63%	37,26%	13,36%	7,79%	4,79%	2,78%	1,28%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	-19,65%	-21,58%	-25,88%	-26,64%	-27,00%	-27,22%	-27,38%
$Q_{DW}-Q_M(n_{CAL}) / Q_{DW}(\%)$	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	332,49%	254,39%	121,52%	99,07%	87,93%	80,75%	75,55%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	124,17%	101,20%	50,14%	39,50%	33,95%	30,28%	27,57%
	$Q_{DW}(v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	34,67%	26,07%	4,12%	-1,00%	-3,75%	-5,60%	-6,98%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	-26,20%	-27,98%	-31,92%	-32,62%	-32,95%	-33,16%	-33,30%

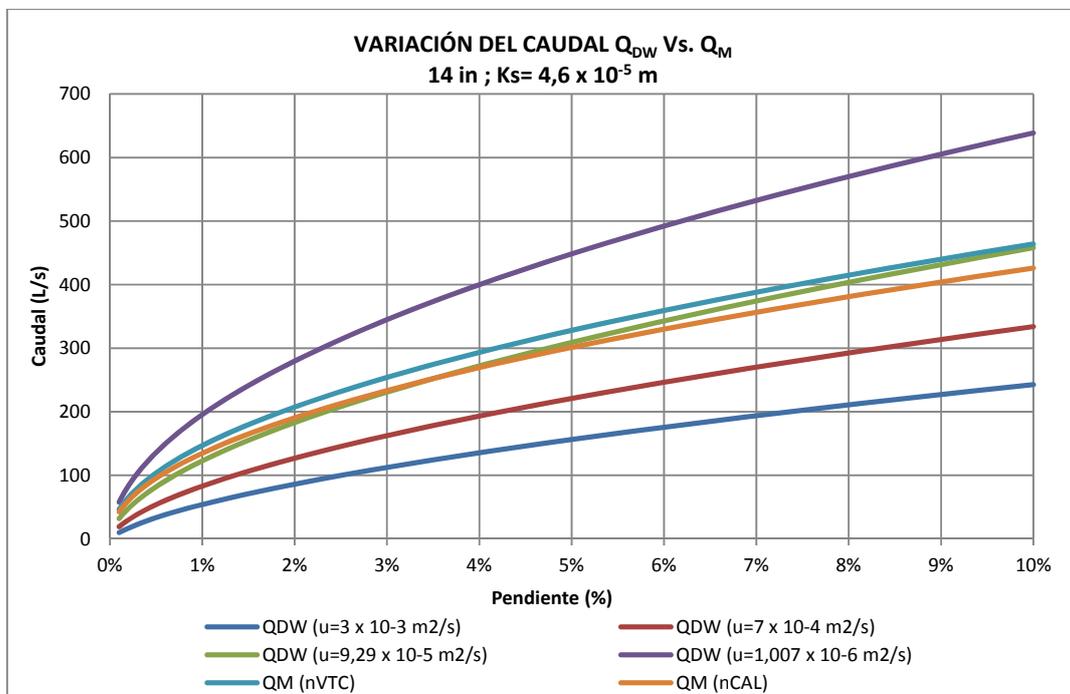


Figura 18. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 14''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

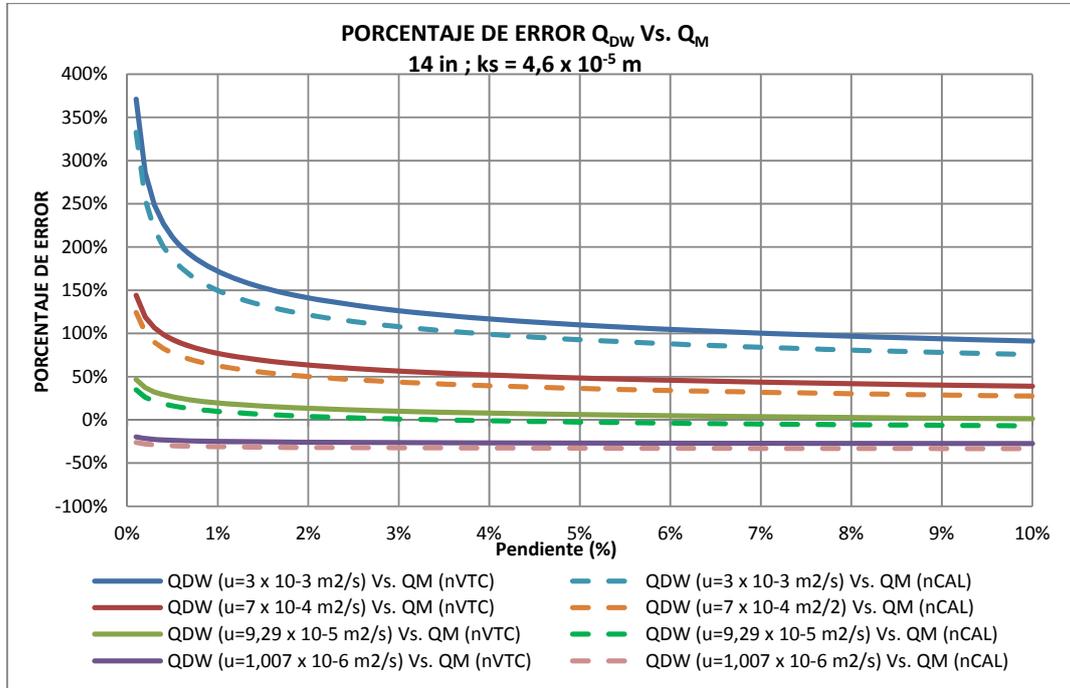


Figura 19. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 14''$ y $k_s = 4,6 \times 10^{-5}$ m.

Para un diámetro de 14'' y un $k_s = 4,6 \times 10^{-5}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0,1\%$ y $v = 3,02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 9,85$ L/s.
- Cuando $S = 0,1\%$ y $v = 1,007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 57,73$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3,02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 242,69$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 1,007 \times 10^{-6}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 638,74$ L/s.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 82,9% y un 62,0%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de " n_{VTC} " varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $v = 9,29 \times 10^{-5}$ m²/s y $v = 1,007 \times 10^{-6}$ m²/s, encontrando que para pendientes mayores al 3,1% los porcentajes de error cuando se compara $Q_{DW}(9,29 \times 10^{-5}$ m²/s) Vs. $Q_M(n_{VTC})$ son menores al 10%.

Cuando se compara $Q_{DW}(1,007 \times 10^{-6}$ m²/s) Vs. $Q_M(n_{CAL})$, el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre -26,20% y 33,30%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.85% y -6.98%) se obtienen para pendientes mayores al 1%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 3% y 4%. Para la pendiente de 3.5% los caudales prácticamente se igualan, y para pendientes menores el caudal Q_M (n_{CAL}), está sobrestimado hasta en un 34.7% frente al caudal Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 7%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 370.88% y 91.13%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -19.65% y -27.38%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.73%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -26.20% y -33.30%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.1%.

4.1.7 Diámetro = 16" y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 12" y la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Tabla 15. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 16''$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

		PENDIENTE (%)							
		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000	
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	15,8770	26,8167	130,6267	204,2345	264,1021	316,3992	363,6646	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	28,8869	45,2128	188,7369	286,3605	364,6347	432,4349	493,3478	
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	46,8328	70,5692	268,3895	398,5574	501,6292	590,2186	669,3599	
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	83,7235	121,1960	404,2629	577,2801	710,2706	822,4739	921,3716	
	$Q_M (n_{VTC})$	67,4835	95,4361	301,7954	426,8031	522,7249	603,5908	674,8350	
	$Q_M (n_{CAL})$	61,9822	87,6561	277,1930	392,0100	480,1123	554,3859	619,8223	
$Q_{DW}(n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	325,04%	255,88%	131,04%	108,98%	97,93%	90,77%	85,57%	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	133,61%	111,08%	59,90%	49,04%	43,36%	39,58%	36,79%	
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	44,09%	35,24%	12,45%	7,09%	4,21%	2,27%	0,82%	
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-19,40%	-21,25%	-25,35%	-26,07%	-26,40%	-26,61%	-26,76%	
$Q_{DW}(n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	290,39%	226,87%	112,20%	91,94%	81,79%	75,22%	70,44%	
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	114,57%	93,87%	46,87%	36,89%	31,67%	28,20%	25,64%	
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	32,35%	24,21%	3,28%	-1,64%	-4,29%	-6,07%	-7,40%	
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-25,97%	-27,67%	-31,43%	-32,09%	-32,40%	-32,60%	-32,73%	

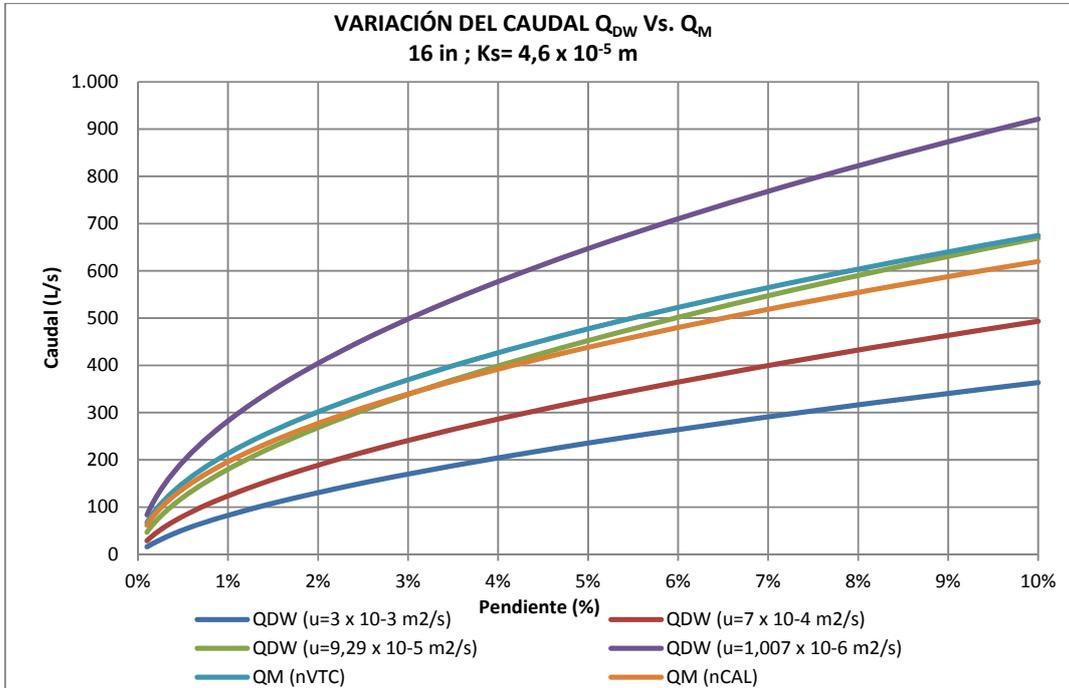


Figura 20. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 16''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

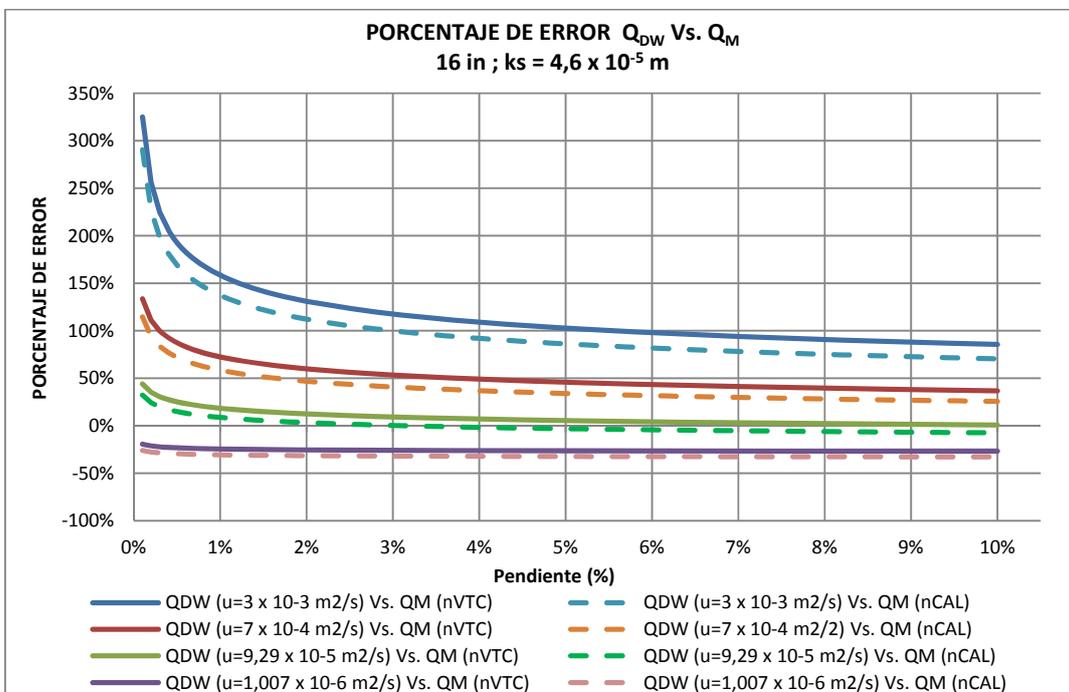


Figura 21. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 16''$ y $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

Para un diámetro de 16" y un $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 15.88 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.1\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 83.73 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 363.66 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 921.37 \text{ L/s}$.

De lo anterior se concluye que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 81.1% y un 60.5%, en función de la viscosidad del fluido, cuando se compara con la capacidad hidráulica de la tubería cuando a través de esta fluye agua a 20°C.

Los caudales calculados con el valor de " n_{VTC} " varían entre los obtenidos cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con $\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, encontrando que para pendientes mayores al 2.8% los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) son menores al 10% y menores al $\pm 1\%$ para pendientes mayores al 9.7%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre -25.97% y 32.73%.

Los menores porcentajes de error (entre 9.66% y -7.40%) se obtienen para pendientes mayores al 0.9%, cuando se compara los caudales de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}). Se observa que este porcentaje de error es menor al $\pm 1\%$ para un rango de pendientes entre 2.8% y 3.6%. Para la pendiente de 3.1% los caudales prácticamente se igualan, y para pendientes menores el caudal Q_M (n_{CAL}), está sobre estimado hasta en un 32.35% frente al caudal Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$); mientras que para pendientes mayores el caudal está subestimado en un 7.40%.

Los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 325.04% y 85.57%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -19.40% y -26.76%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 7.36%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre -25.97% y -32.73%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 6.76%.

4.2 VARIACIÓN DEL $Q_{DW} (v)$, $Q_M (n_{VTC})$ y $Q_M (n_{CAL})$: CAUDALES RESULTANTES Y PORCENTAJE DE ERROR ($ks = 2.9 \times 10^{-3} m$)

A continuación se presentan los resultados para cada diámetro evaluado con la rugosidad absoluta de la tubería vieja de acero al carbón ($2.9 \times 10^{-3} m$).

4.2.1 Diámetro = 4" y $ks = 2.9 \times 10^{-3} m$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 4" y la rugosidad absoluta de $2.9 \times 10^{-3} m$.

Tabla 16. Resumen de la variación de $Q_{DW} (v)$, $Q_M (n_{VTC})$ y $Q_M (n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 4''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3} m$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s)$	-0,0700	0,0563	1,7978	3,2228	4,4305	5,5094	6,4990
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s)$	0,3907	0,7048	3,7803	5,9716	7,7475	9,2927	10,6840
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} m^2/s)$	0,9928	1,5344	6,0033	8,8614	11,0847	12,9719	14,6415
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} m^2/s)$	1,5945	2,2631	7,2003	10,1912	12,4863	14,4211	16,1258
	$Q_M (n_{VTC})$	1,9354	2,7371	8,6554	12,2406	14,9916	17,3109	19,3541
	$Q_M (n_{CAL})$	1,7776	2,5140	7,9498	11,2428	13,7695	15,8997	17,7764
$Q_{DW} (n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	-2864,97%	4759,00%	381,44%	279,81%	238,37%	214,21%	197,80%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	395,36%	288,34%	128,96%	104,98%	93,50%	86,28%	81,15%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	94,95%	78,38%	44,18%	38,13%	35,25%	33,45%	32,19%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	21,38%	20,94%	20,21%	20,11%	20,06%	20,04%	20,02%
$Q_{DW} (n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	-2639,57%	4362,89%	342,20%	248,85%	210,79%	188,59%	173,52%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	354,98%	256,68%	110,30%	88,27%	77,73%	71,10%	66,38%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	79,06%	63,84%	32,42%	26,87%	24,22%	22,57%	21,41%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} m^2/s) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	11,49%	11,09%	10,41%	10,32%	10,28%	10,25%	10,24%

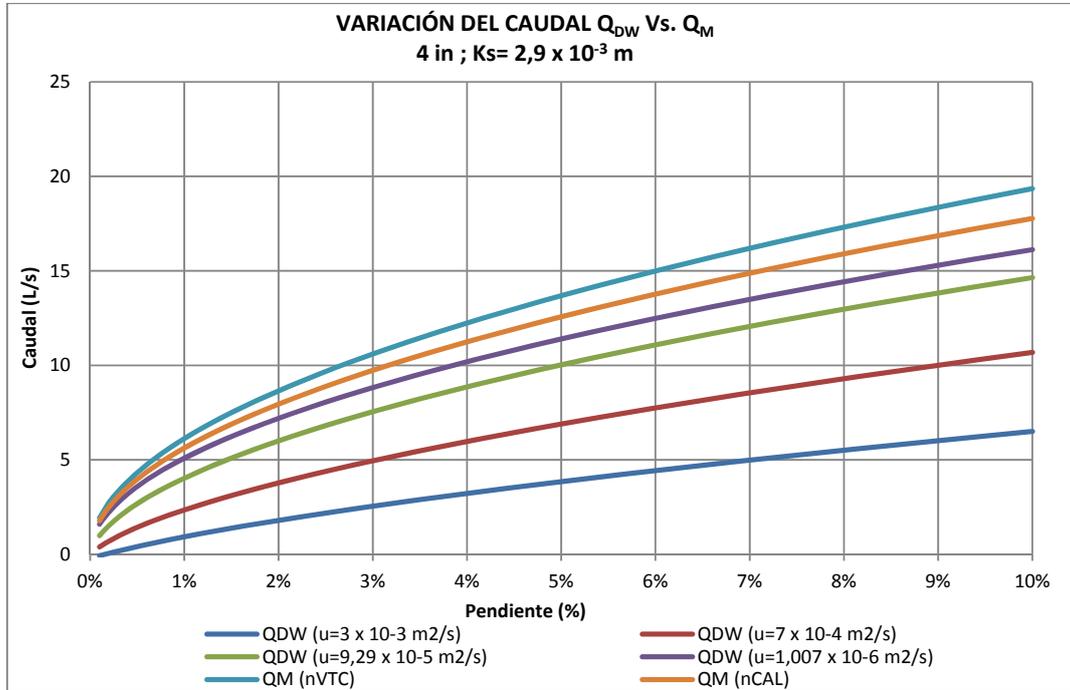


Figura 22. Variación de Q_{DW} (u), Q_M (nVTC) y Q_M (nCAL), cuando $d = 4''$ y $k_s = 2,9 \times 10^{-3}$ m.

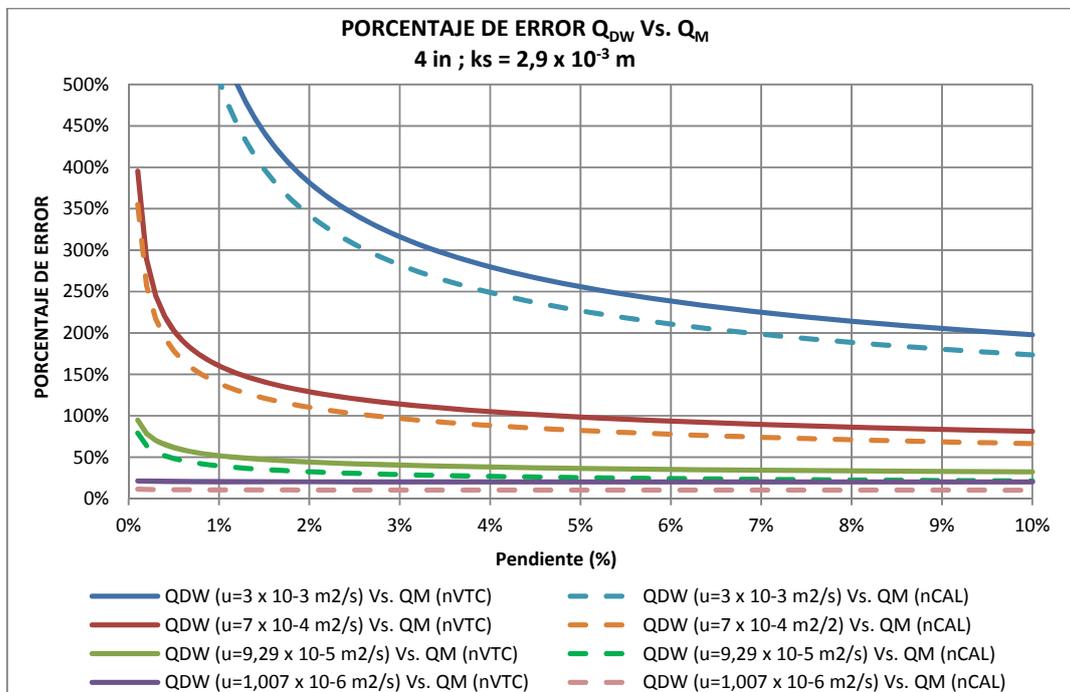


Figura 23. Porcentaje de error de Q_{DW} (u) Vs. Q_M (nVTC) y Q_{DW} (u) Vs. Q_M (nCAL), cuando $d = 4''$ y $k_s = 2,9 \times 10^{-3}$ m.

En la tabla anterior se puede observar que para la mayor viscosidad ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) y la menor pendiente considerada (0.1%) el caudal resulta ser negativo, por lo que para esa combinación en particular el análisis se llevará a cabo con los resultados obtenidos para la pendiente de 0.2%.

Para el diámetro de 4" y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.2\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 0.056 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.2\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 1.94 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 6.50 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 19.35 \text{ L/s}$.

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 16, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 97.5% y un 59.7%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{VTC} " y el valor de " n_{CAL} "

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el porcentaje de error es casi constante, sin importar la pendiente de la tubería, variando este entre 11.49% y 10.24%. De igual forma sucede al comparar Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$. Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 21.38% y 20.02%.

En ningún caso se obtiene porcentajes de error menores al 10%. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ variando estos entre 4759.00% y 197.80%.

Se puede notar que a medida que aumenta la pendiente, el porcentaje de error de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ y Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ prácticamente se igualan en un valor cercano al 20%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 21.38% y 20.02%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 1.06%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 11.49% y 10.24%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 1.25%.

4.2.2 Diámetro = 6'' y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 6'' y la rugosidad absoluta de 2.9×10^{-3} m.

Tabla 17. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 6''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	0,3503	0,9276	7,4334	12,3969	16,5197	20,1618	23,4775
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	1,6309	2,7283	12,8982	19,9430	25,5984	30,4918	34,8805
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	3,2847	4,9957	18,8060	27,5312	34,2943	40,0241	45,0873
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	4,8178	6,8322	21,7050	30,7150	37,6286	43,4570	48,5919
	$Q_M (n_{VTC})$	5,7750	8,1670	25,8264	36,5240	44,7326	51,6527	57,7495
	$Q_M (n_{CAL})$	5,3042	7,5012	23,7210	33,5465	41,0860	47,4420	53,0418
$Q_{DW}(v) / Q_{DW}(v)$ (%)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	1548,67%	780,43%	247,44%	194,62%	170,78%	156,19%	145,98%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	254,11%	199,35%	100,23%	83,14%	74,75%	69,40%	65,56%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	75,81%	63,48%	37,33%	32,66%	30,44%	29,05%	28,08%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	19,87%	19,54%	18,99%	18,91%	18,88%	18,86%	18,85%
$Q_{DW}(v) / Q_{DW}(v)$ (%)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	1414,27%	708,66%	219,11%	170,60%	148,71%	135,31%	125,93%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	225,24%	174,95%	83,91%	68,21%	60,50%	55,59%	52,07%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	61,48%	50,15%	26,14%	21,85%	19,80%	18,53%	17,64%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	10,10%	9,79%	9,29%	9,22%	9,19%	9,17%	9,16%

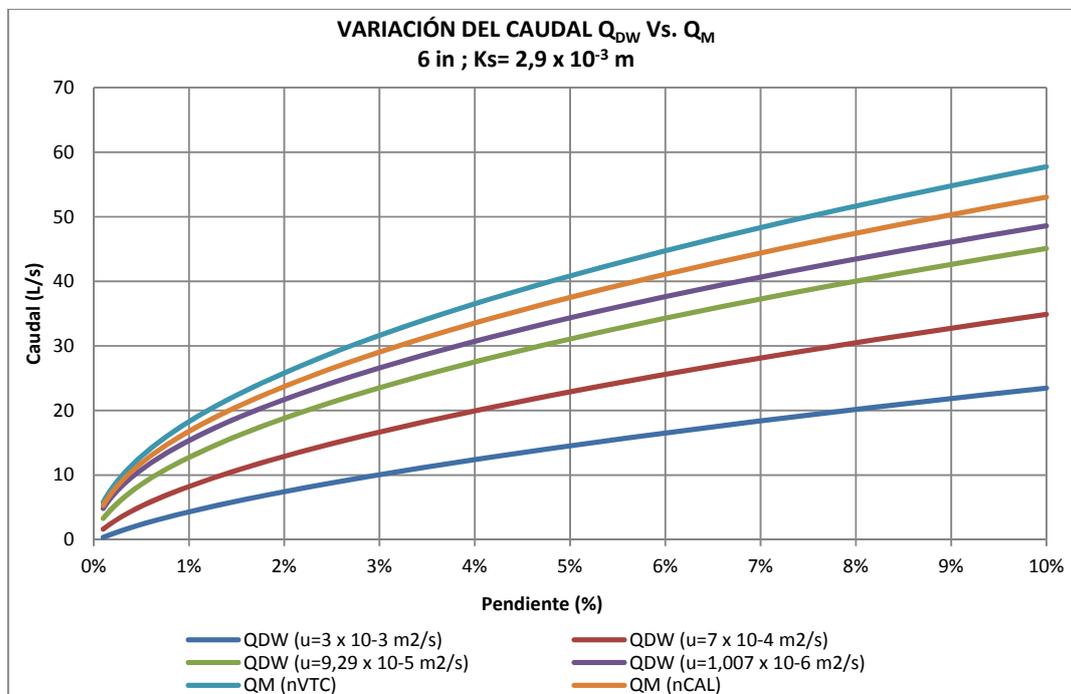


Figura 24. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 6''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

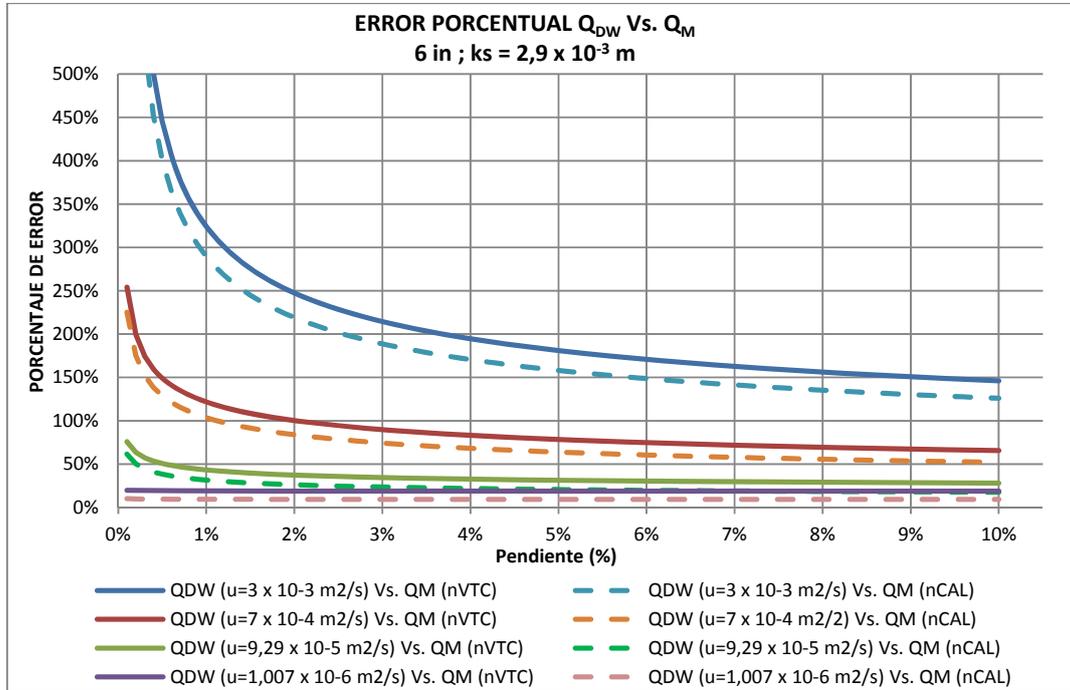


Figura 25. Porcentaje de error de $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 6''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 6'' y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 0.35 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 5.78 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 23.48 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 57.75 \text{ L/s}$.

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 17, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 92.7% y un 51.7%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de "n_{VTC}" y el valor de "n_{CAL}".

Cuando se compara $Q_{DW}(1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 10.10% y 9.16%. Es de notar que para esta

comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.87% y 18.85%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 1548.67% y 145.98%.

Se puede notar que a partir de la pendiente del 6% el porcentaje de error de Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}) y Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) prácticamente se igualan en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.87% y 28.85%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 1.02%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 10.10% y 9.16%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.94%.

4.2.3 Diámetro = 8" y $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 8" y la rugosidad absoluta de $2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Tabla 18. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 8"$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (l/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	1,4205	2,8664	17,9801	29,1527	38,3428	46,4166	53,7389
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	3,9585	6,4322	28,7407	43,9647	56,1226	66,6096	75,9945
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	7,2065	10,8681	40,0634	58,3843	72,5583	84,5547	95,1490
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	10,0640	14,2653	45,2843	64,0754	78,4943	90,6500	101,3594
	$Q_M (n_{VTC})$	12,0060	16,9790	53,6923	75,9323	92,9977	107,3845	120,0595
	$Q_M (n_{CAL})$	11,0272	15,5949	49,3153	69,7423	85,4165	98,6305	110,2723
$Q_{DW} - Q_M (n_{VTC}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	745,20%	492,35%	198,62%	160,46%	142,54%	131,35%	123,41%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	203,29%	163,97%	86,82%	72,71%	65,70%	61,21%	57,98%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	66,60%	56,23%	34,02%	30,06%	28,17%	27,00%	26,18%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	19,30%	19,02%	18,57%	18,50%	18,48%	18,46%	18,45%
$Q_{DW} - Q_M (n_{CAL}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	676,30%	444,06%	174,28%	139,23%	122,77%	112,49%	105,20%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	178,57%	142,45%	71,59%	58,63%	52,20%	48,07%	45,11%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	53,02%	43,49%	23,09%	19,45%	17,72%	16,65%	15,89%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	9,57%	9,32%	8,90%	8,84%	8,82%	8,80%	8,79%

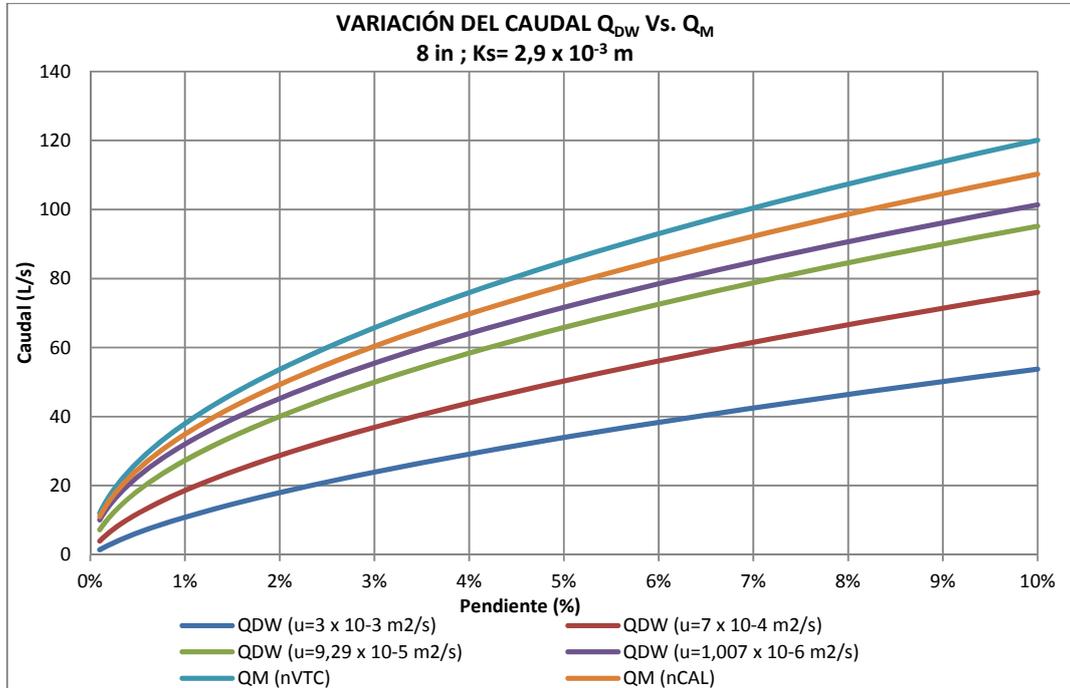


Figura 26. Variación de Q_{DW} (u), Q_M (nVTC) y Q_M (nCAL), cuando $d = 8''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

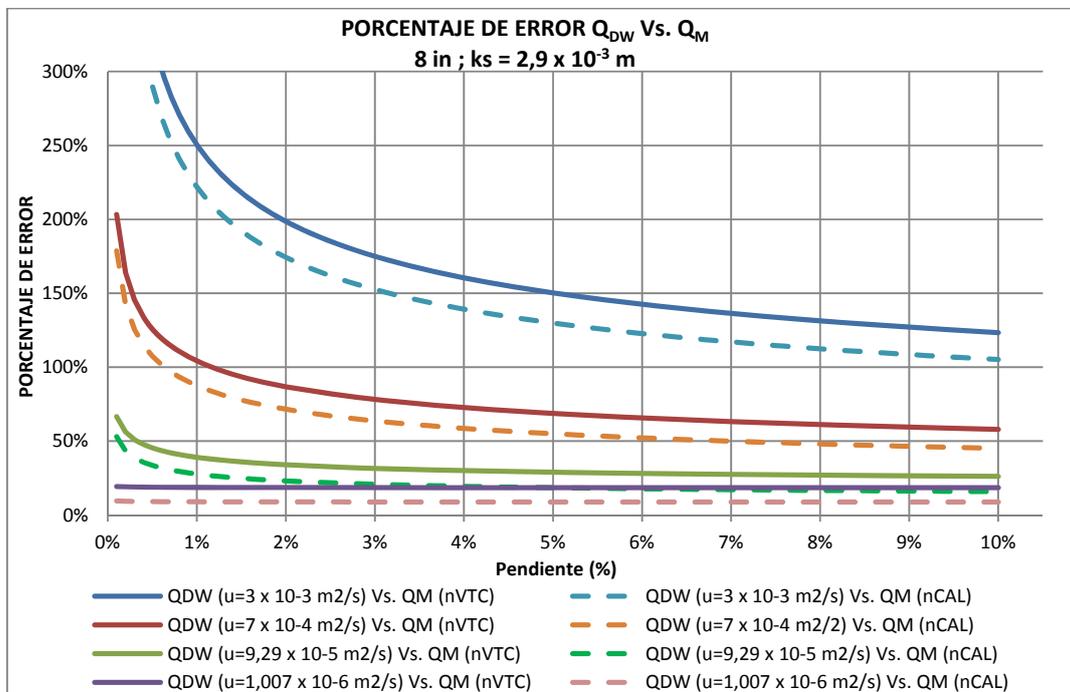


Figura 27. Porcentaje de error de Q_{DW} (u) Vs. Q_M (nVTC) y Q_{DW} (u) Vs. Q_M (nCAL), cuando $d = 8''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 8" y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 1.42$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 12.0$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 53.74$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 120.06$ L/s

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 18, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 85.9% y un 47.0%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{VTC} " y el valor de " n_{CAL} ".

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 9.57% y 8.79%. Es de notar que para esta comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.30% y 18.45%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} (3.02×10^{-3} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ variando estos entre 745.20% y 123.41%.

Se puede notar que al comparar los porcentajes de error entre Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ y Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, entre las pendientes del 4% y 6.3%, el error prácticamente se iguala en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.30% y 18.45%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.85%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 9.57% y 8.79%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.78%.

4.2.4 Diámetro = 10'' y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 10'' y la rugosidad absoluta de 2.9×10^{-3} m.

Tabla 19. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 10''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	3,5656	6,5544	36,4263	58,0594	75,7373	91,2089	105,2035
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	8,0363	12,8306	55,2665	83,9184	106,7128	126,3298	143,8571
	$Q_{DW}(v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	13,7095	20,5517	74,6208	108,3864	134,4741	156,5389	176,0164
	$Q_{DW}(v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	18,4837	26,1915	83,0985	117,5721	144,0247	166,3252	185,9724
	$Q_M(n_{VTC})$	22,0061	31,1214	98,4144	139,1790	170,4587	196,8288	220,0613
	$Q_M(n_{CAL})$	20,2122	28,5843	90,3916	127,8331	156,5629	180,7833	202,1218
$Q_{DW}(v) / Q_M(n_{VTC})$ (%)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	517,17%	374,82%	170,17%	139,72%	125,07%	115,80%	109,18%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	173,83%	142,56%	78,07%	65,85%	59,74%	55,81%	52,97%
	$Q_{DW}(v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	60,52%	51,43%	31,89%	28,41%	26,76%	25,74%	25,02%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	19,06%	18,82%	18,43%	18,38%	18,35%	18,34%	18,33%
$Q_{DW}(v) / Q_M(n_{CAL})$ (%)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	466,86%	336,11%	148,15%	120,18%	106,72%	98,21%	92,12%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	151,51%	122,78%	63,56%	52,33%	46,71%	43,10%	40,50%
	$Q_{DW}(v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	47,43%	39,08%	21,13%	17,94%	16,43%	15,49%	14,83%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	9,35%	9,14%	8,78%	8,73%	8,71%	8,69%	8,68%

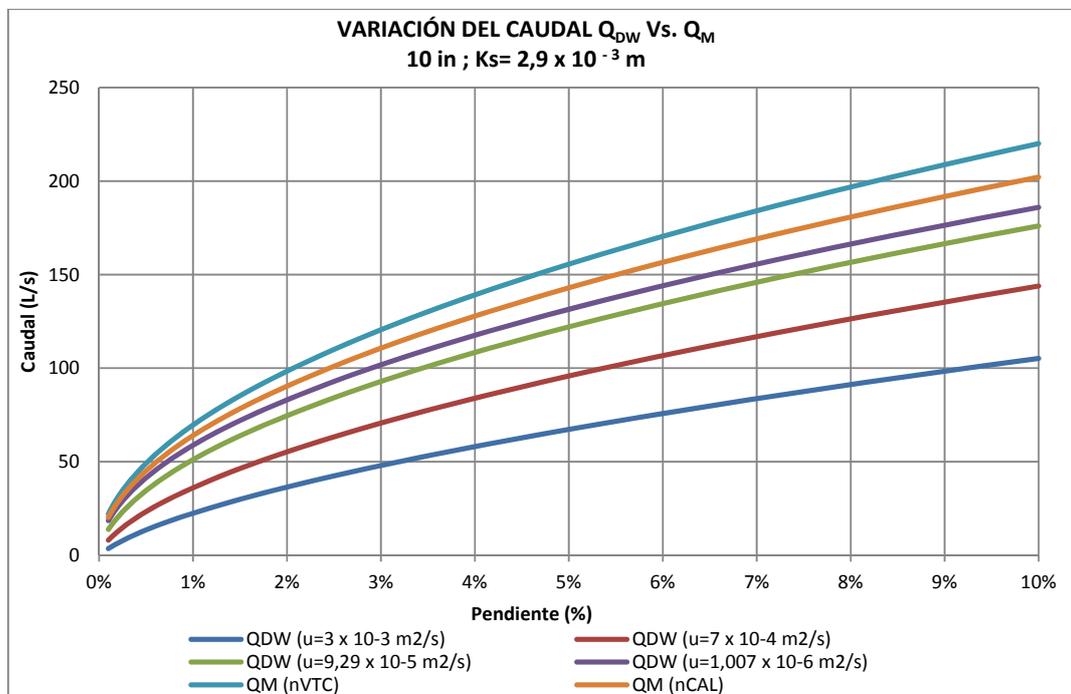


Figura 28. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 10''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

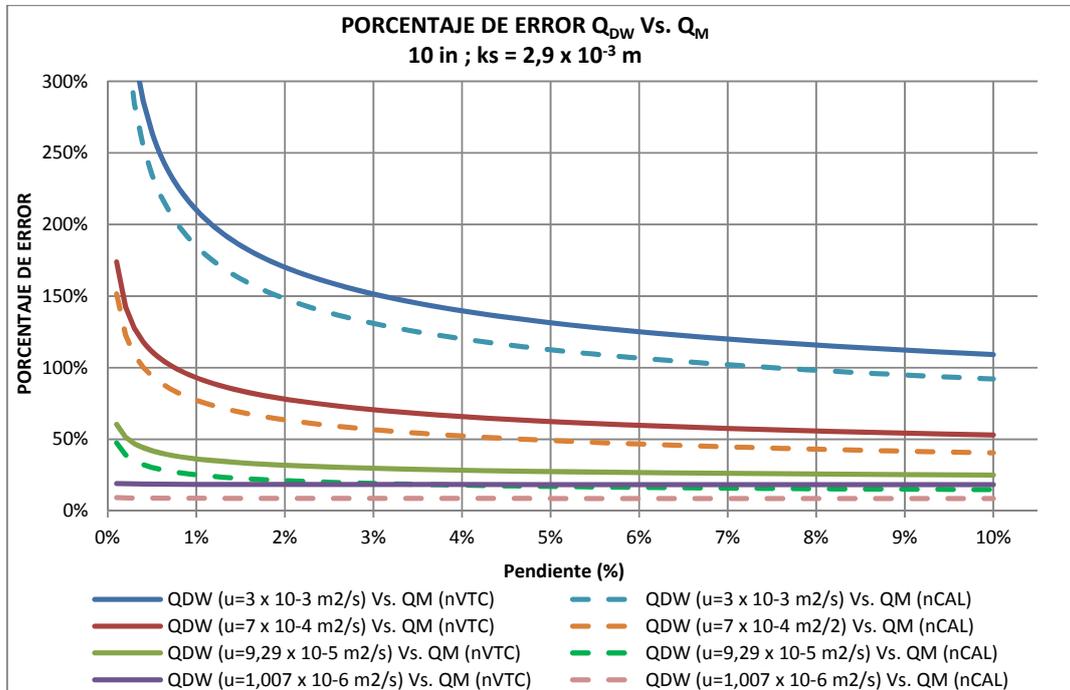


Figura 29. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 10''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 10'' y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 3.56 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 22.0 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, entonces $Q_{DW} = 105.20 \text{ L/s}$.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 220.06 \text{ L/s}$.

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 19, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 80.7% y un 43.4%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de "n_{VTC}" y el valor de "n_{CAL}".

Cuando se compara $Q_{DW}(1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 9.35% y 8.68%. Es de notar que para esta comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.06% y 18.33%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 517.17% y 109.18%.

Se puede notar que al comparar los porcentajes de error entre Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}) y Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), entre las pendientes del 2.9% y 4.6%, el error prácticamente se iguala en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.06% y 18.33%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.73%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 9.35% y 8.68%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.67%.

4.2.5 Diámetro = 12" y $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 12" y la rugosidad absoluta de $2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Tabla 20. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 12''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	7,3275	12,8321	66,1919	104,2649	135,2254	162,2446	186,6358
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	14,6235	23,0673	96,7632	146,1115	185,2543	218,8807	248,8868
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	23,8089	35,5278	127,4868	184,7000	228,8596	266,1906	299,1340
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	31,2409	44,2580	140,3626	198,5814	243,2542	280,9153	314,0953
	$Q_M (n_{VTC})$	37,1785	52,5784	166,2675	235,1378	287,9838	332,5350	371,7855
	$Q_M (n_{CAL})$	34,1477	48,2922	152,7134	215,9693	264,5073	305,4267	341,4775
$Q_{DW}(n_{VTC}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	407,38%	309,74%	151,19%	125,52%	112,97%	104,96%	99,20%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	154,24%	127,94%	71,83%	60,93%	55,45%	51,93%	49,38%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	56,15%	47,99%	30,42%	27,31%	25,83%	24,92%	24,29%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$	19,01%	18,80%	18,46%	18,41%	18,39%	18,38%	18,37%
$Q_{DW}(n_{CAL}) / Q_{DW} (\%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	366,02%	276,34%	130,71%	107,14%	95,60%	88,25%	82,96%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	133,51%	109,35%	57,82%	47,81%	42,78%	39,54%	37,20%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	43,42%	35,93%	19,79%	16,93%	15,58%	14,74%	14,16%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$	9,30%	9,12%	8,80%	8,76%	8,74%	8,73%	8,72%

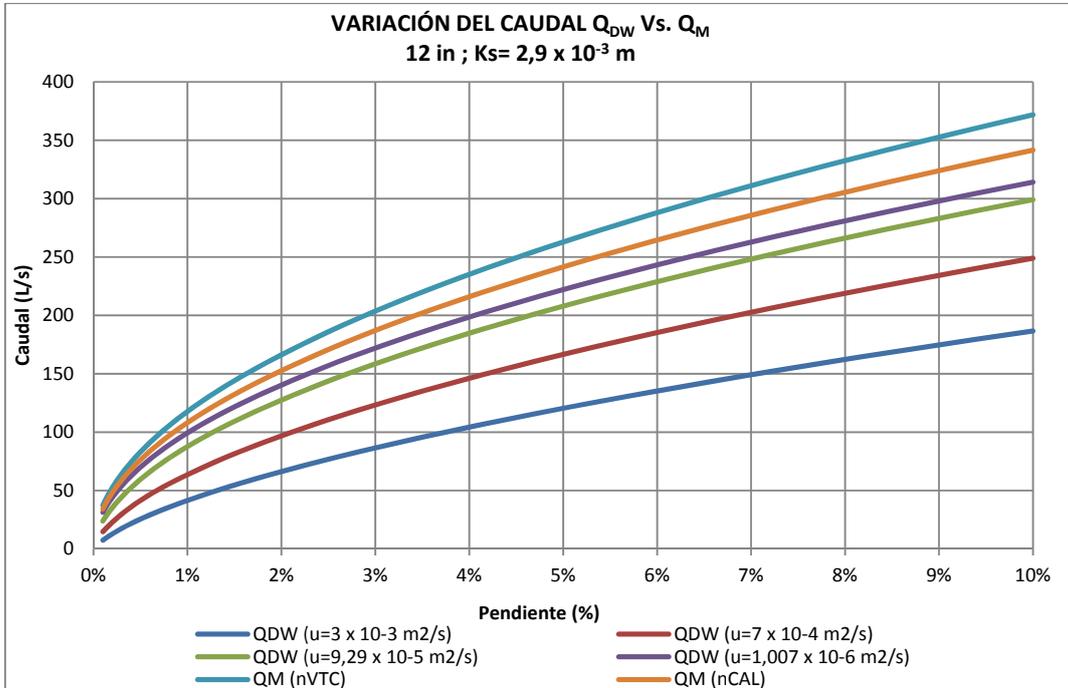


Figura 30. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 12''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

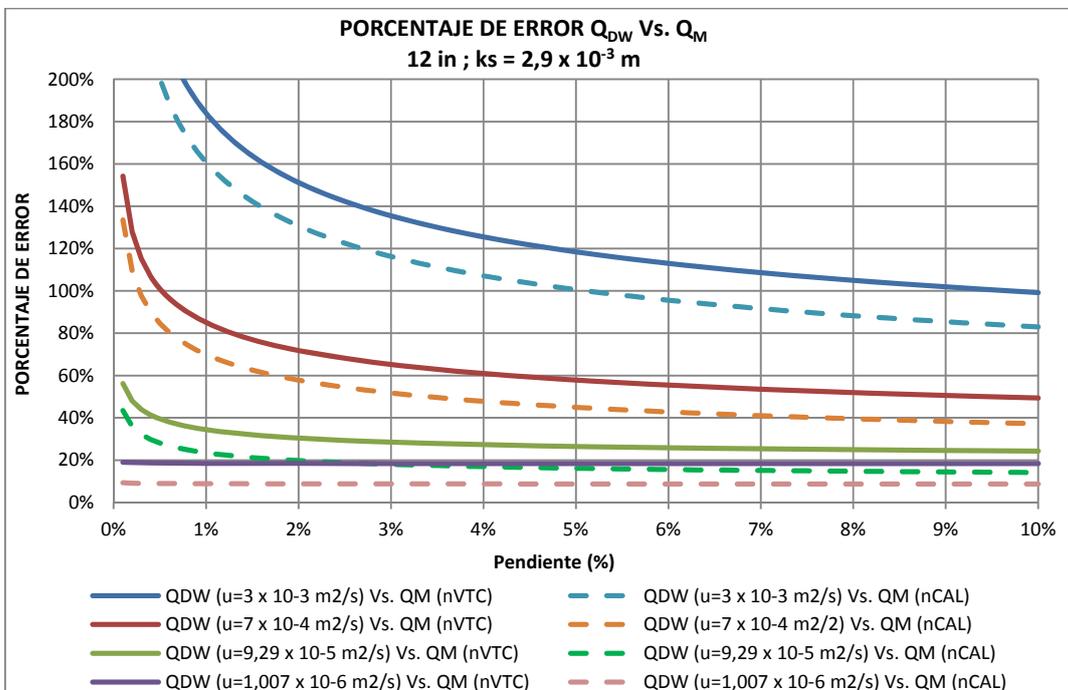


Figura 31. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 12''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 12" y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 7.33$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 37.18$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 186.64$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 371.78$ L/s

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 20, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 76.6% y un 40.6%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{VTC} " y el valor de " n_{CAL} ".

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 9.30% y 8.72%. Es de notar que para esta comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.01% y 18.37%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} (3.02×10^{-3} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ variando estos entre 407.38% y 99.20%.

Se puede notar que al comparar los porcentajes de error entre Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ y Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, entre las pendientes del 2.2% y 3.5%, el error prácticamente se iguala en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.01% y 18.37%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.64%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 9.30% y 8.72%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.68%.

4.2.6 Diámetro = 14" y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 14" y la rugosidad absoluta de 2.9×10^{-3} m.

Tabla 21. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 14''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

PENDIENTE (%)		0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$	9,7943	16,8885	84,8936	133,1444	172,3078	206,4480	237,2438
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$	18,7648	29,4686	122,3848	184,4013	233,5341	275,7126	313,3312
	$Q_{DW}(v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$	30,0183	44,7128	159,7033	231,1417	286,2597	332,8459	373,9518
	$Q_{DW}(v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$	38,9720	55,2055	175,0552	247,6583	303,3688	350,3348	391,7128
	$Q_M(n_{VTC})$	46,3865	65,6004	207,4467	293,3739	359,3082	414,8934	463,8649
	$Q_M(n_{CAL})$	42,6051	60,2526	190,5356	269,4580	330,0173	381,0712	426,0506
$Q_{DW}(v) / Q_{DW}(v)$ (%)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	373,61%	288,43%	144,36%	120,34%	108,53%	100,97%	95,52%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	147,20%	122,61%	69,50%	59,10%	53,86%	50,48%	48,04%
	$Q_{DW}(v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	54,53%	46,71%	29,90%	26,92%	25,52%	24,65%	24,04%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$	19,03%	18,83%	18,50%	18,46%	18,44%	18,43%	18,42%
$Q_{DW}(v) / Q_{DW}(v)$ (%)	$Q_{DW}(v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	335,00%	256,77%	124,44%	102,38%	91,53%	84,58%	79,58%
	$Q_{DW}(v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	127,05%	104,46%	55,69%	46,13%	41,31%	38,21%	35,97%
	$Q_{DW}(v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	41,93%	34,75%	19,31%	16,58%	15,29%	14,49%	13,93%
	$Q_{DW}(v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$	9,32%	9,14%	8,84%	8,80%	8,78%	8,77%	8,77%

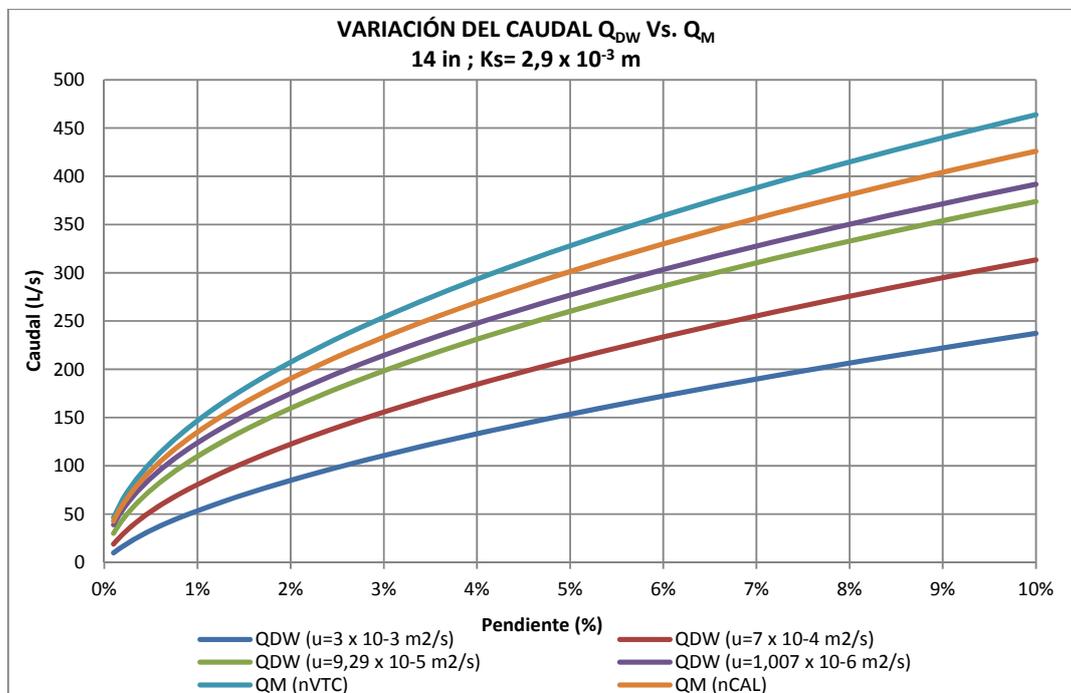


Figura 32. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 14''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

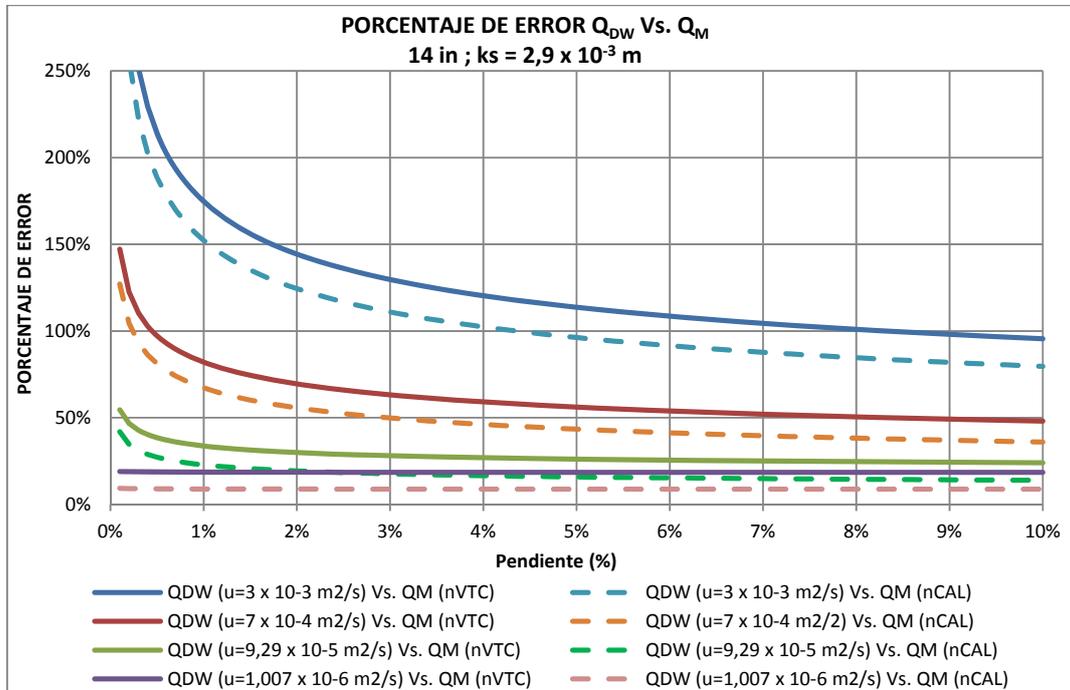


Figura 33. Porcentaje de error de $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(u)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 14''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 14" y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 9.79$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 46.39$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 237.24$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M(n_{VTC}) = 463.87$ L/s

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 21, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 74.9% y un 39.4%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de "nVTC" y el valor de "nCAL".

Cuando se compara $Q_{DW}(1.007 \times 10^{-6}$ m²/s) Vs. $Q_M(n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 9.32% y 8.77%. Es de notar que para esta comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.03% y 18.42%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) variando estos entre 373.61% y 95.52%.

Se puede notar que al comparar los porcentajes de error entre Q_{DW} ($9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}) y Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), entre las pendientes del 2.0% y 3.1%, el error prácticamente se iguala en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.03% y 18.42%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.61%.

Cuando se compara Q_{DW} ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}), el error permanece prácticamente constante, variando este entre 9.32% y 8.77%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.55%.

4.2.7 Diámetro = 16" y $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos al evaluar el diámetro de 16" y la rugosidad absoluta de $2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Tabla 22. Resumen de la variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$ y cálculo del porcentaje de error cuando $d = 16''$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

		PENDIENTE (%)	0,100	0,200	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
CAUDAL (L/s)	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$		15,7904	26,6440	128,9256	200,8626	259,0784	309,7388	355,3801
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$		28,5198	44,4848	181,8835	273,1107	345,2478	407,1033	462,2265
	$Q_{DW} (v=9,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})$		44,3885	65,9269	233,7250	337,7292	417,9256	485,6880	545,4684
	$Q_{DW} (v=1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$		56,6567	80,2451	254,3938	359,8903	440,8407	509,0850	569,2095
	$Q_M (n_{VTC})$		67,4835	95,4361	301,7954	426,8031	522,7249	603,5908	674,8350
	$Q_M (n_{CAL})$		61,9822	87,6561	277,1930	392,0100	480,1123	554,3859	619,8223
$Q_{DW}(n_{VTC}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$		327,37%	258,19%	134,08%	112,49%	101,76%	94,87%	89,89%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$		136,62%	114,54%	65,93%	56,27%	51,41%	48,26%	46,00%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$		52,03%	44,76%	29,12%	26,37%	25,08%	24,28%	23,72%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{VTC})$		19,11%	18,93%	18,63%	18,59%	18,57%	18,56%	18,56%
$Q_{DW}(n_{CAL}) / Q_{DW} (%)$	$Q_{DW} (v=3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$		292,53%	228,99%	115,00%	95,16%	85,32%	78,98%	74,41%
	$Q_{DW} (v=7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$		117,33%	97,05%	52,40%	43,54%	39,06%	36,18%	34,09%
	$Q_{DW} (v=9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$		39,64%	32,96%	18,60%	16,07%	14,88%	14,14%	13,63%
	$Q_{DW} (v=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \text{ Vs. } Q_M (n_{CAL})$		9,40%	9,24%	8,96%	8,92%	8,91%	8,90%	8,89%

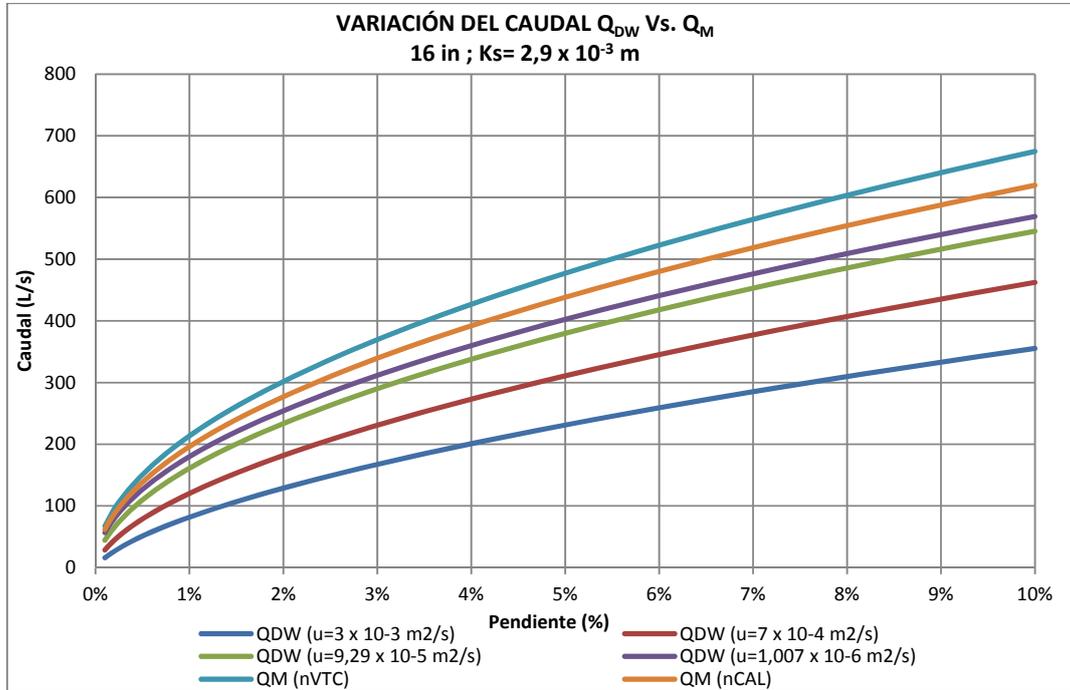


Figura 34. Variación de $Q_{DW}(v)$, $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 16''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

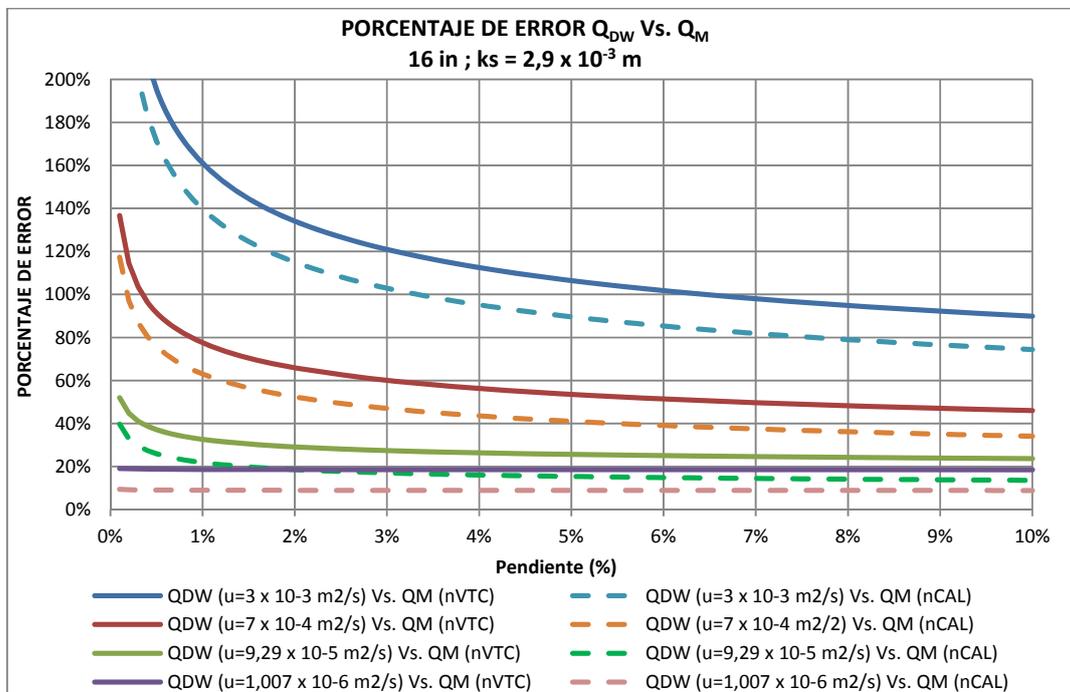


Figura 35. Porcentaje de error de $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_{DW}(v)$ Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $d = 16''$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m.

Para el diámetro de 16" y el $k_s = 2.9 \times 10^{-3}$ m, las variaciones del caudal se encuentran entre los siguientes rangos:

- Cuando $S = 0.1\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 15.79$ L/s.
- Cuando $S = 0.1\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 67.48$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y $v = 3.02 \times 10^{-3}$ m²/s, entonces $Q_{DW} = 355.38$ L/s.
- Cuando $S = 10\%$ y n_{VTC} , entonces $Q_M (n_{VTC}) = 674.84$ L/s.

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 22, se puede observar que cuando la pendiente permanece constante para el diámetro y el k_s evaluados, la capacidad hidráulica de la tubería disminuye entre un 72.2% y un 37.6%, cuando se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach con la menor y la mayor viscosidad consideradas para el estudio.

Al igual que la combinación anterior, los mayores caudales resultantes se obtienen al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{VTC} " y el valor de " n_{CAL} ".

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, se obtienen los menores porcentajes de error, variando estos entre 9.40% y 8.89%. Es de notar que para esta comparación, los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes, sin importar la pendiente de la tubería.

De igual forma, sucede al comparar Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, Para esta última comparación los porcentajes de error varían entre 19.11% y 18.56%.

No se observan porcentajes de error menores al $\pm 1\%$. Por otro lado, los mayores porcentajes de error se obtienen cuando se compara Q_{DW} (3.02×10^{-3} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ variando estos entre 327.37% y 89.89%.

Se puede notar que al comparar los porcentajes de error entre Q_{DW} (9.29×10^{-5} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ y Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, entre las pendientes del 1.6% y 2.5%, el error prácticamente se iguala en un valor cercano al 18%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 19.11% y 18.56%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.55%.

Cuando se compara Q_{DW} (1.007×10^{-6} m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, el error permanece prácticamente constante, variando este entre 9.40% y 8.89%, presentando una variación entre la menor y mayor pendiente evaluada de 0.51%.

4.3 ERROR PORCENTUAL DEL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE MANNING Vs. EL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE DARCY - WEISBACH (k_s y v constante)

A fin de encontrar si existe una viscosidad en particular para la cual la ecuación de Manning puede ser aplicada, a continuación se presentan las gráficas mostrando los porcentajes de error inducidos por el uso de esta ecuación, cuando la rugosidad de la tubería y la viscosidad del fluido permanecen constantes, para 3 de los 7 diámetros evaluados.

En las mencionadas gráficas se muestran los porcentajes de error inducidos cuando se usa la ecuación de Manning tanto con el valor de “ n ” recomendado por Ven. T. Chow (n_{VTC}), como con el valor de “ n ” calculado con la ecuación de Zaghoul (n_{CAL}), con respecto al empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach en combinación con la ecuación de Colebrook-White.

El efecto del cambio de rugosidad absoluta de la tubería por envejecimiento también será analizado en este capítulo.

4.3.1 $\nu = 3.021 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

- $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

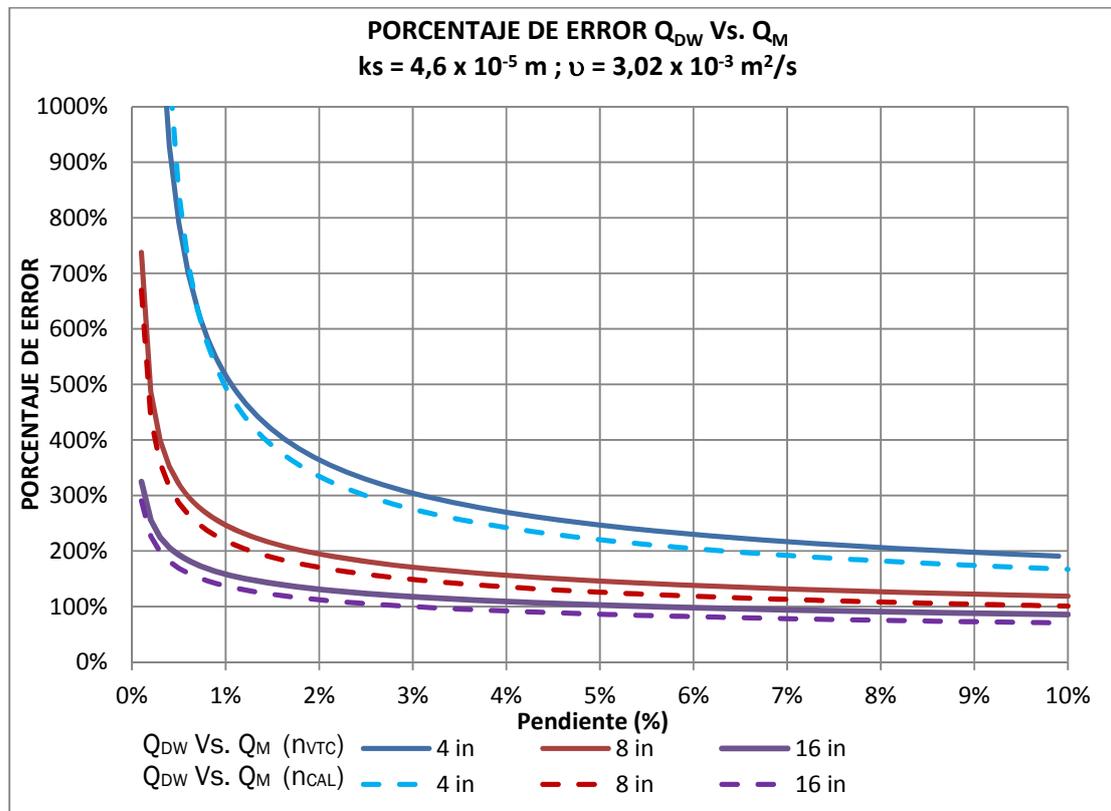


Figura 36. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

Cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se encuentran diferencias entre los errores porcentuales que están entre 374.9% (cuando $d=4''$ y $S=0.2\%$) y 15.1% (cuando $d=16''$ y $S=10\%$).

- $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

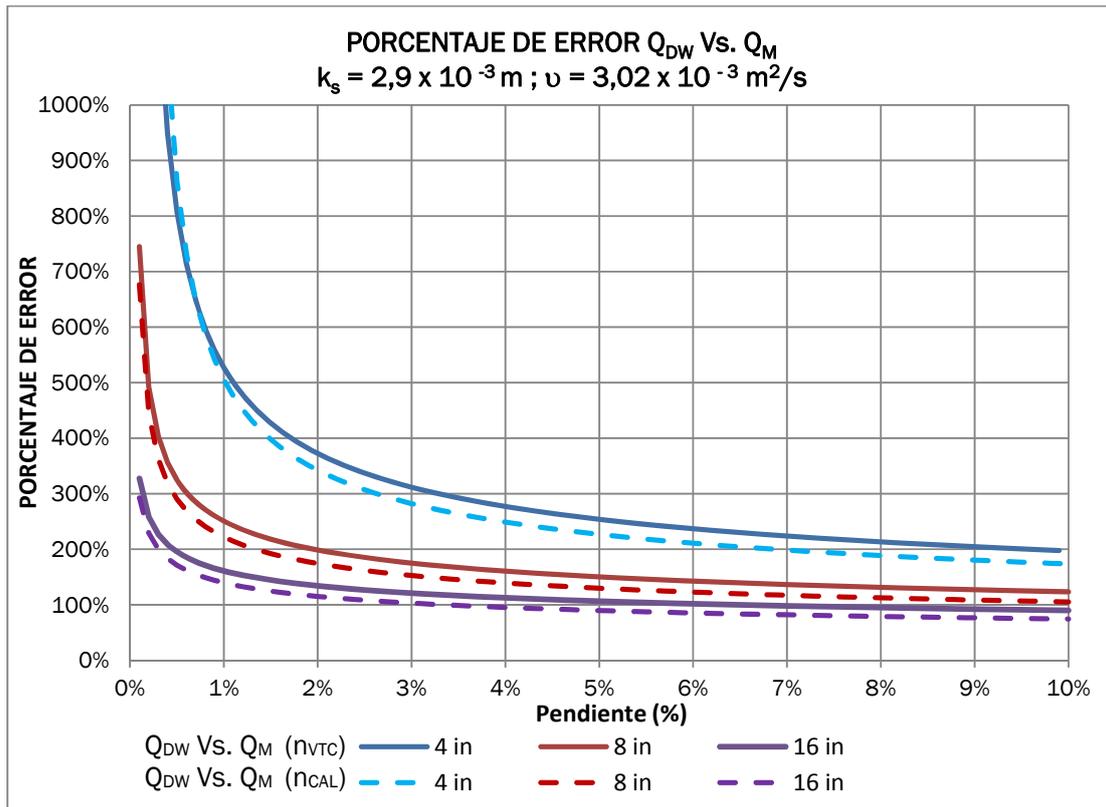


Figura 37. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

De esta manera cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se encuentran diferencias entre los errores porcentuales que están entre 396.1% (cuando $d=4''$ y $S=0.2\%$) y 15.5% (cuando $d=16''$ y $S=10\%$).

En las siguientes tablas se puede observar los mayores y menores porcentajes de error encontrados para cada uno de los diámetros evaluados y las dos rugosidades absolutas consideradas cuando se compara Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}).

Tabla 23. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}).

DIÁMETRO	Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$
4"	4498.73%*	4759.00%*	190.82%	197.80%
6"	1523.39%	1548.67%	140.54%	145.98%
8"	737.87%	745.20%	118.52%	123.41%
10"	512.95%	517.17%	104.57%	109.18%
12"	404.33%	407.38%	94.76%	99.20%
14"	370.88%	373.61%	91.13%	95.52%
16"	325.04%	327.37%	85.57%	89.89%

* Para $S = 0.1\%$ y $d = 4''$ el caudal resulta ser negativo, por lo que para esta combinación en particular el porcentaje mostrado es el resultado de hacer la comparación con la pendiente igual a 0.2%.

Tabla 24. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}).

DIÁMETRO	Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$
4"	4123.84%*	4362.89%*	167.11%	173.52%
6"	1391.05%	1414.27%	120.93%	125.93%
8"	669.57%	676.30%	100.71%	105.20%
10"	462.98%	466.86%	87.89%	92.12%
12"	363.22%	366.02%	78.88%	82.96%
14"	332.49%	335.00%	75.55%	79.58%
16"	290.39%	292.53%	70.44%	74.41%

* Para $S = 0.1\%$ y $d = 4''$ el caudal resulta ser negativo, por lo que para esta combinación en particular el porcentaje mostrado es el resultado de hacer la comparación con la pendiente igual a 0.2%.

Cuando se aplica la ecuación de Manning para el cálculo del caudal cuando a través de una tubería se conduce un fluido con una viscosidad similar a la evaluada ($3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) se generan los siguientes errores porcentuales:

- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$: Los errores porcentuales se encuentran entre 4498.73% y 85.57%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) cuando $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$: Los errores porcentuales se encuentran entre 4759.00% y 89.89%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$: Los errores porcentuales se encuentran entre 4123.84% y 70.44%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) cuando $ks = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$: Los errores porcentuales se encuentran entre 4362.89% y 74.41%.

No se observan porcentajes de error menores al 25% para ninguna de las comparaciones realizadas. Los porcentajes de error anteriormente listados, evidencian el problema de subdimensionamiento de las redes de alcantarillados cuando se aplica la ecuación de Manning para diseños de sistemas a través de los cuales se va a conducir fluidos con una viscosidad de similares características a la evaluada.

Se observa que el error porcentual aumenta conforme el diámetro y la pendiente de la tubería se hace más pequeña, y que los errores porcentuales son mayores para la mayor rugosidad absoluta evaluada (2.9×10^{-3} m). Sin embargo, a medida que el diámetro aumenta, se observa que cuando la pendiente permanece constante la diferencia entre los errores encontrados para las dos rugosidades va disminuyendo.

4.3.2 $\nu = 7.005 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

- **$ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.** En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $\nu = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

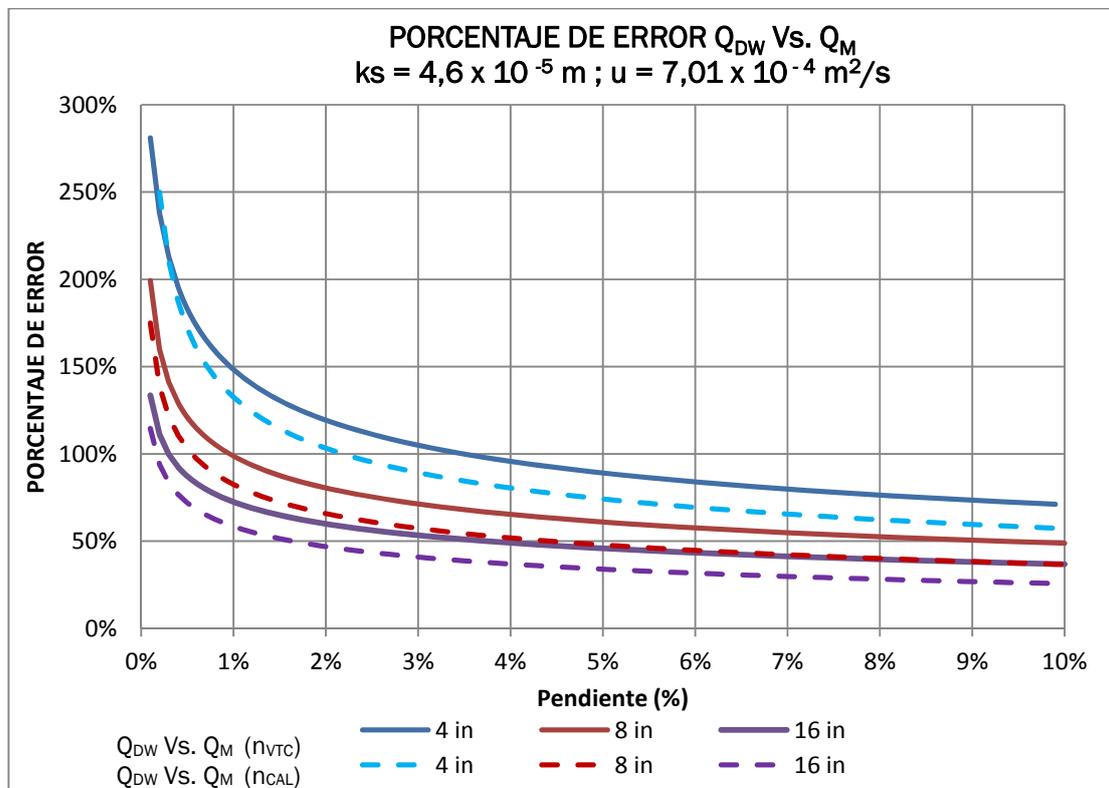


Figura 38. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

De esta manera cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se encuentran diferencias entre los errores porcentuales que están entre 39.7% (cuando $d=4''$ y $S=0.1\%$) y 11.5% (cuando $d=16''$ y $S=10\%$).

No se observan porcentajes de error menores al 25% para ninguna de las comparaciones realizadas.

- **$k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.** En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy - Weisbach cuando $\nu = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

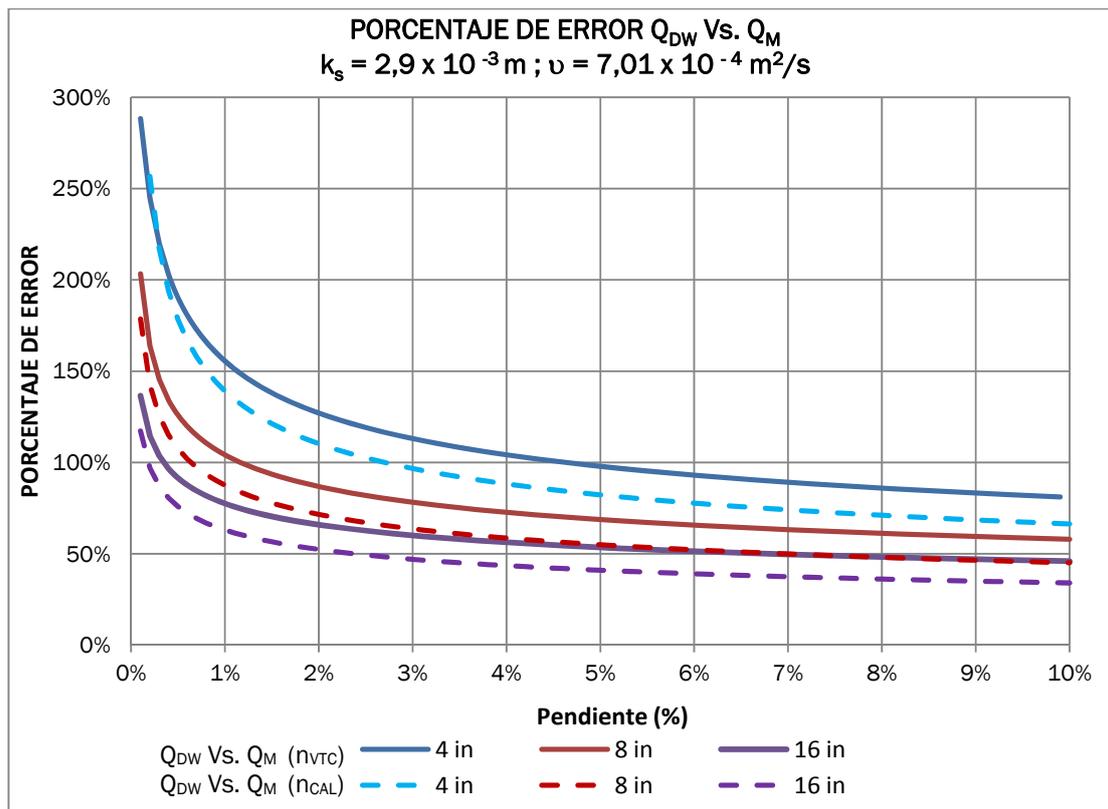


Figura 39. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, Sin importar el diámetro evaluado.

De esta manera cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se encuentran diferencias entre los errores porcentuales que están entre 40.4% (cuando $d=4''$ y $S=0.1\%$) y 11.9% (cuando $d=16''$ y $S=10\%$).

En la siguientes tablas se puede observar los mayores y menores porcentajes de error encontrados para cada uno de los diámetros evaluados y las dos rugosidades absolutas consideradas cuando se compara Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}).

Tabla 25. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}).

DIÁMETRO	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m
4''	386.85%	395.36%	71.17%	81.15%
6''	249.12%	254.11%	56.22%	65.56%
8''	199.29%	203.29%	48.83%	57.98%
10''	170.32%	173.83%	43.87%	52.97%
12''	151.01%	154.24%	40.25%	49.38%
14''	144.06%	147.20%	38.89%	48.04%
16''	133.61%	136.32%	36.79%	46.00%

Tabla 26. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}).

DIÁMETRO	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m
4''	347.16%	354.98%	57.22%	66.38%
6''	220.66%	225.24%	43.49%	52.07%
8''	174.89%	178.57%	36.70%	45.11%
10''	148.28%	151.51%	32.14%	40.50%
12''	130.55%	133.51%	28.82%	37.20%
14''	124.17%	127.05%	27.57%	35.97%
16''	114.57%	117.33%	25.64%	34.09%

Se evidencia que la aplicación de la ecuación de Manning para el cálculo del caudal cuando a través de la tubería fluye un fluido con la viscosidad evaluada no es adecuada, generando los siguientes errores porcentuales:

- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m: Los errores porcentuales se encuentran entre 386.85% y 36.79%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) cuando $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m: Los errores porcentuales se encuentran entre 395.36% y 46.00%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m: Los errores porcentuales se encuentran entre 347.16% y 25.64%.
- Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) cuando $ks = 2.9 \times 10^{-3}$ m: Los errores porcentuales se encuentran entre 354.98% y 34.09%.

No se observan porcentajes de error menores al 25% para ninguna de las comparaciones realizadas. Los porcentajes de error anteriormente listados, evidencian el problema de subdimensionamiento de las redes de alcantarillados cuando se aplica la ecuación de Manning para diseños de sistemas a través de los cuales se va a conducir fluidos con una viscosidad de similares características a la evaluada.

Es muy posible que al aplicar la ecuación de Manning para tuberías con una rugosidad absoluta menor o igual a 4.6×10^{-5} m, diámetros mayores a 12" y pendientes mayores al 10%, se alcancen porcentajes de error menores al 25%, cuando por el ducto se conduce un fluido con una viscosidad similar 7.01×10^{-4} m²/s. Sin embargo esto debe ser verificado en estudios posteriores.

Se observa que el porcentaje de error al aplicar la ecuación de Manning aumenta conforme el diámetro y la pendiente de la tubería se hace más pequeña. Por otro lado, para la mayor rugosidad absoluta considerada (2.9×10^{-3} m), los porcentajes de error son ligeramente mayores que los obtenidos cuando $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

4.3.3 $\nu = 9.29 \times 10^{-5}$ m²/s

- **$ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m** En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $\nu = 9.29 \times 10^{-5}$ m²/s y $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

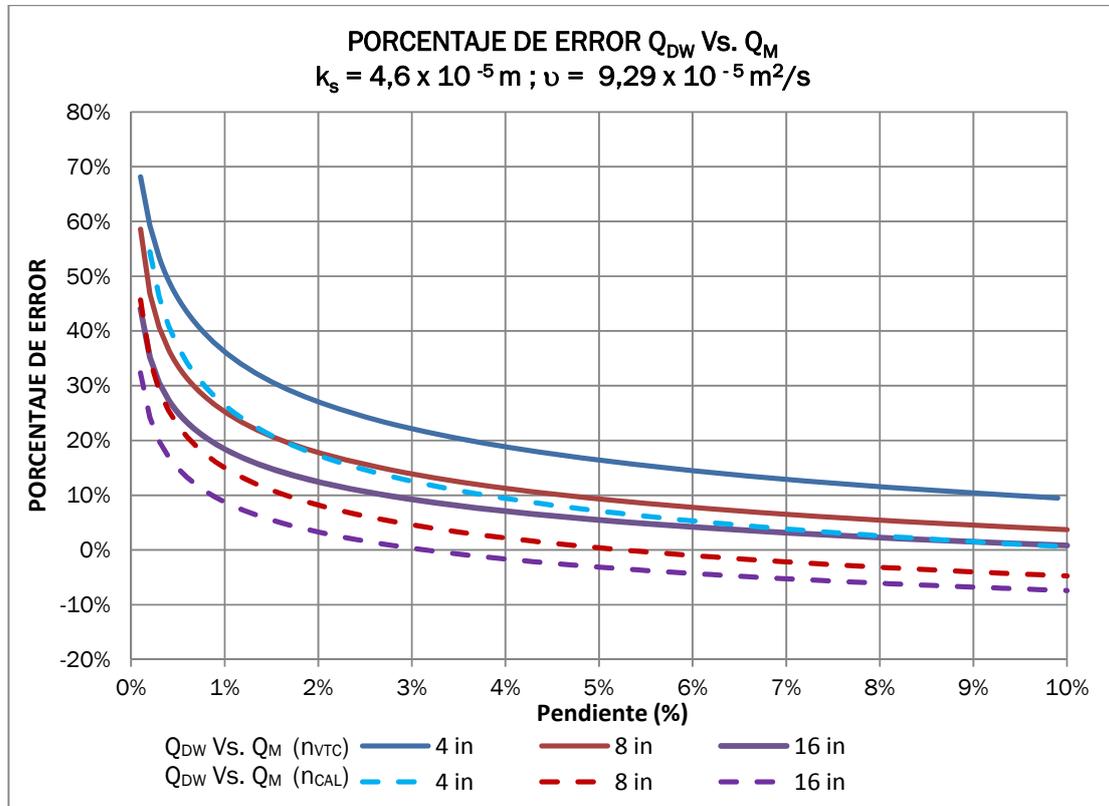


Figura 40. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

Cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se encuentran porcentajes de error menores al 25%, 10% y 1% para los siguientes rangos de pendientes:

Tabla 27. Rango de pendientes para los cuales el porcentaje de Error es menor al 25%, 10% y 1% para la comparación Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Comparación	Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{VTC})$			Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{CAL})$		
	$25\% \leq e \leq 10\%$	$10\% \leq e \leq 1\%$	$< 1\%$	$25\% \leq e \leq 10\%$	$10\% \leq e \leq 1\%$	$< 1\%$
% Error	Rango de Pendientes (%)			Rango de Pendientes (%)		
Diámetro	Rango de Pendientes (%)			Rango de Pendientes (%)		
4"	2.5% al 9.4%	9.5% al 10%	N/A	1.1% al 3.7%	3.8% al 9.4%	9.5% al 10%
6"	1.5% al 6.0%	6.1% al 10%	N/A	0.7% al 2.2%	2.3% al 6% 7.8% al 10%	6.1% al 7.7%
8"	1.1% al 4.6%	4.7% al 10%	N/A	0.5% al 1.6%	1.7% al 4.6% 6.1% al 10%	4.7% al 6.0%
10"	0.8% al 3.7%	3.8% al 10%	N/A	0.4% al 1.2%	1.3% al 3.7% 5% al 10%	3.8% al 4.9%
12"	0.7% al 3.2%	3.3% al 10%	N/A	0.3% al 1.0%	1.1% al 3.1% 4.3% al 10%	3.2% al 4.2%
14"	0.6% al 3.0%	3.1% al 10%	N/A	0.3% al 0.9%	1.0% al 3.0% 4.1% al 10%	3.1% al 4.0%
16"	0.6% al 2.7%	2.8% al 9.6%	9.7% al 10%	0.2% al 0.8%	0.9% al 2.7% 3.7% al 10%	2.8% al 3.6%

Cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{VTC})$, se encuentra lo siguiente:

- Para el diámetro de 4" el 70% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 6% de las pendientes presentan errores entre el 10 y el 1%.
- Para el diámetro de 8" el 36% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 54% de las pendientes presentan errores entre el 10 y el 1%.
- Para el diámetro de 16" el 22% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, el 69% de las pendientes presentan errores entre en 10% y el 1%, y 4% de las pendientes presentan errores menores al 1%.

De lo anterior se concluye que a medida que aumenta el diámetro de la tubería los porcentajes de error van disminuyendo hasta encontrar un rango de pendientes en el cual este es menor al 1%. Esto se presenta para el diámetro de 16" y pendientes mayores al 9.6%.

Se encuentra que entre el 76% y 95% de las pendientes evaluadas los porcentajes de error son menores al 25%, dependiendo esto del diámetro de la tubería.

Por otro lado cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{CAL})$, se observa que a medida que aumenta la pendiente el porcentaje de error va disminuyendo hasta encontrar un rango de pendientes en el cual este es menor del 1%. Después de este rango, el porcentaje de error comienza de nuevo a aumentar. Este rango se desplaza hacia pendientes menores a medida que aumenta el diámetro de la tubería. También se logra evidenciar lo siguiente:

- Para el diámetro de 4" el 27% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, el 57% de las pendientes presentan errores entre el 10% y el 1%, y el 6% de las pendientes presentan errores menores al 1%.
- Para el diámetro de 8" el 12% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, el 70% de las pendientes presentan errores entre el 10% y el 1%, y el 14% de las pendientes presentan errores menores al 1%.
- Para el diámetro de 16" el 7% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, el 83% de las pendientes presentan errores entre el 10% y el 1%, y el 9% presentan errores menores al 1%.

Se encuentra que entre el 90% y 99% de las pendientes evaluadas los porcentajes de error son menores al 25%, y entre un 63% y un 92% de las mismas los porcentajes de error son menores al 10%. Esto teniendo en cuenta el diámetro de la tubería a emplear para el diseño.

- $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

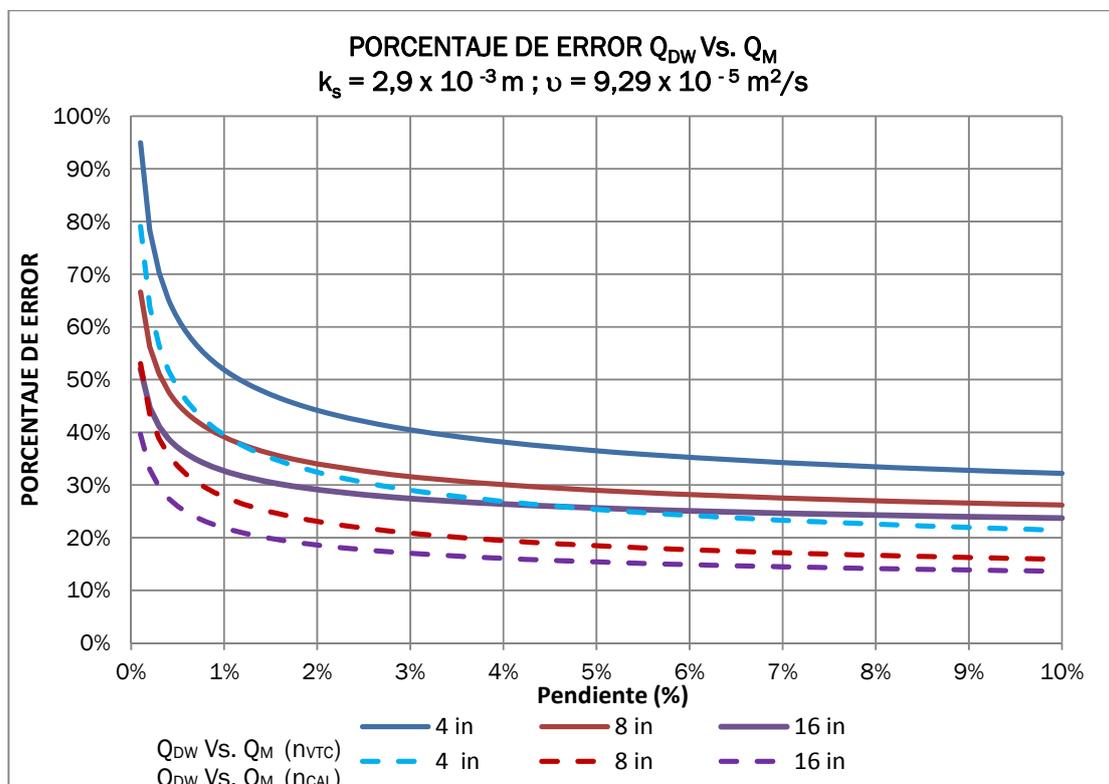


Figura 41. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (nVTC) y Q_M (nCAL), cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

Cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{VTC})$ y Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, se encuentran porcentajes de error menores al 25%, para los siguientes rangos de pendientes:

Tabla 28. Rango de pendientes para los cuales el porcentaje de Error es menor al 25% para la comparación Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ y $Q_M (n_{CAL})$, cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Comparación	Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{VTC})$	Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$
% error	25% < e < 10%	
Diámetro	Rango de pendientes	
4"	N/A	5.3 % al 10%
6"	N/A	2.4% al 10%
8"	N/A	1.5% al 10%
10"	N/A	1.1% al 10%
12"	7.8% al 10%	0.8% al 10%
14"	7.1% al 10%	0.7% al 10%
16"	6.2% al 10%	0.6% al 10%

Cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{VTC})$, se encuentra lo siguiente:

- Para el diámetro de 12" el 23% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.
- Para el diámetro de 14" el 30% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.
- Para el diámetro de 16" el 39% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.

De lo anterior se concluye que solo para diámetros mayores a 12", en posible encontrar porcentajes de error menores al 25%, y con pendientes mayores al 6.2%, lo cual no es común que se presenten en sistemas de alcantarillado.

Por otro lado cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, se encuentra lo siguiente:

- Para el diámetro de 4" el 48% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.
- Para el diámetro de 8" el 77% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.

- Para el diámetro de 16" el 95% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.

Se observa que igual que para la comparación anterior, a medida que el diámetro de la tubería aumenta, los porcentajes de error van disminuyendo. Sin embargo estos son siempre mayores al 25%.

En la siguientes tablas se puede observar los mayores y menores porcentajes de error encontrados para cada uno de los diámetros evaluados y las dos rugosidades absolutas consideradas cuando se compara Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$.

Tabla 29. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{VTC})$.

DIÁMETRO (in)	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m
4"	85.95%	94.95%	9.50%	32.19%
6"	67.57%	75.81%	5.64%	28.08%
8"	58.60%	66.60%	3.72%	26.18%
10"	52.61%	60.52%	2.46%	25.02%
12"	48.26%	56.15%	1.59%	24.29%
14"	46.63%	54.53%	1.28%	24.04%
16"	44.09%	52.03%	0.82%	23.72%

Tabla 30. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{CAL})$.

DIÁMETRO	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})					
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error			
	ks=4.6x10 ⁻⁵ m	ks=2.9x10 ⁻³ m	ks=4.6x10 ⁻⁵ m		ks=2.9x10 ⁻³ m	
			% error	S	% error	S
4"	70.79%	79.06%	0.57%	10%	21.41%	10%
6"	53.91%	61.48%	-0.05%	6.9%	17.64%	
8"	45.67%	53.02%	-0.05%	5.3%	15.89%	
10"	40.17%	47.43%	0.03%	4.3%	14.83%	
12"	36.18%	43.42%	-0.01%	3.7%	14.16%	
14"	34.67%	41.93%	-0.06%	3.5%	13.93%	
16"	32.35%	39.64%	0.11% a -0.11%	3.1% y 3.2%	13.63%	

De lo anterior se puede concluir que los ingenieros que se muestran renuentes a la aplicación de la ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, podrían hacer uso de la ecuación de Manning para el diseño de sistemas de alcantarillado cuando por a través de este se conduce un fluido de similares características al evaluado ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Siempre es recomendable emplear un “ n ” de Manning calculado mediante la aplicación de ecuaciones empíricas que relacionan el porcentaje de llenado de la tubería con el mencionado coeficiente.
- Una alta rugosidad absoluta de la tubería aumenta el porcentaje de error inducido por el uso de la ecuación de Manning, Por lo tanto es más recomendable aplicar la misma para tuberías poco rugosas cuando la viscosidad del fluido es similar a la evaluada.
- Incluso atendiendo las dos recomendaciones anteriormente mencionadas, se debe tener en cuenta que siempre existe un error asociado con el uso de la ecuación de Manning que implica un subdimensionamiento o un sobredimensionamiento del sistema de alcantarillado, dependiendo esto del diámetro y la pendiente de la tubería a emplear. Esto induce a errores porcentuales que pueden ser menores al 25% en el 90% de los casos, teniendo en cuenta que para diámetros pequeños (menores a 8”) y pendientes bajas (menores al 1%) estos errores pueden ser mayores al mencionado.

4.3.4 $v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

- **$ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.** En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

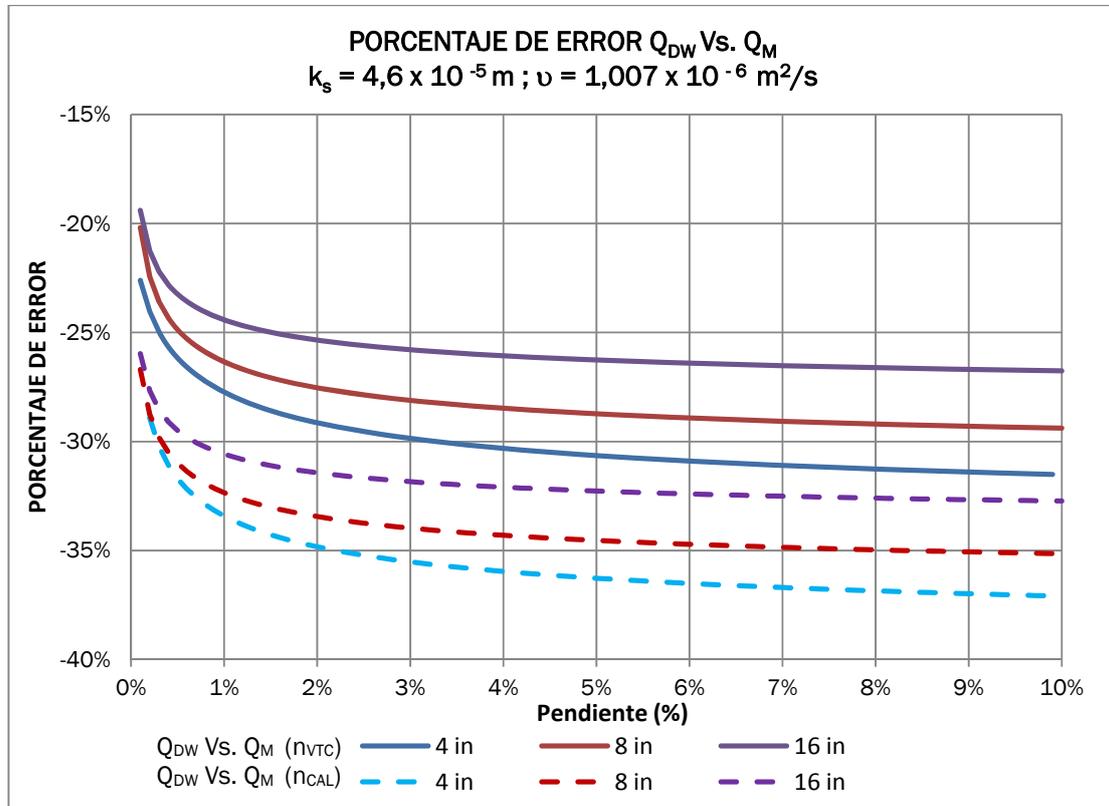


Figura 42. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Como se observa en la gráfica anterior, los porcentajes de error encontrados para este caso son negativos, esto significa que contrario a lo ocurrido en todos los casos anteriormente evaluados, para esta combinación la ecuación de Manning resulta en un sobredimensionamiento de sistema. Es decir que el caudal real es menor al caudal calculado con la mencionada ecuación.

Por otro lado, los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), resultan ser más negativos que los porcentajes de error cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}). Esto se deriva en una situación opuesta a los resultados obtenidos en los casos anteriores, pues para este en particular, el empleo de un valor del “ n ” recomendado por Ven T. Chow resulta generando porcentaje de errores menores a los encontrados cuando se emplea un valor de “ n ” calculado por medio de la ecuación de Zaghoul, pues los primeros se acercan más al 0% de error.

Cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}), se encuentran porcentajes de error menores al 25%, para los siguientes rangos de pendientes:

Tabla 31. Rango de pendientes para los cuales el porcentaje de Error es menor al 25% para la comparación Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{VTC})$ y $Q_M(n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

Comparación	Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{VTC})$
% error	$25\% < e < 10\%$
Diámetro	Rango de pendientes
4"	0.1% al 0.4%
6"	0.1% al 0.4%
8"	0.1% al 0.5%
10"	0.1% al 0.6%
12"	0.1% al 0.7%
14"	0.1% al 1.0%
16"	0.1% al 1.5%

Como se mencionó en el párrafo anterior, para este caso el menor porcentaje de error se obtiene para el menor diámetro y la menor pendiente considerada para el estudio ($d= 4''$ y $S=0.1\%$).

Cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{VTC})$, se encuentra lo siguiente:

- Para el diámetro de 4'' el 4% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.
- Para el diámetro de 8'' el 5% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.
- Para el diámetro de 16'' el 15% de las pendientes evaluadas presentan errores menores al 25%.

Solo entre un 4% y 15% de los casos evaluados presentan porcentajes de error menores al 25%. Para el resto de estos los errores van hasta un 31.51%.

Por otro lado cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M(n_{CAL})$, se encuentra para ningún caso se presentan porcentajes de error menores al 25%

- $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al calcular los porcentajes de error cuando se compara el caudal calculado con la ecuación de Manning y la de Darcy-Weisbach cuando $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

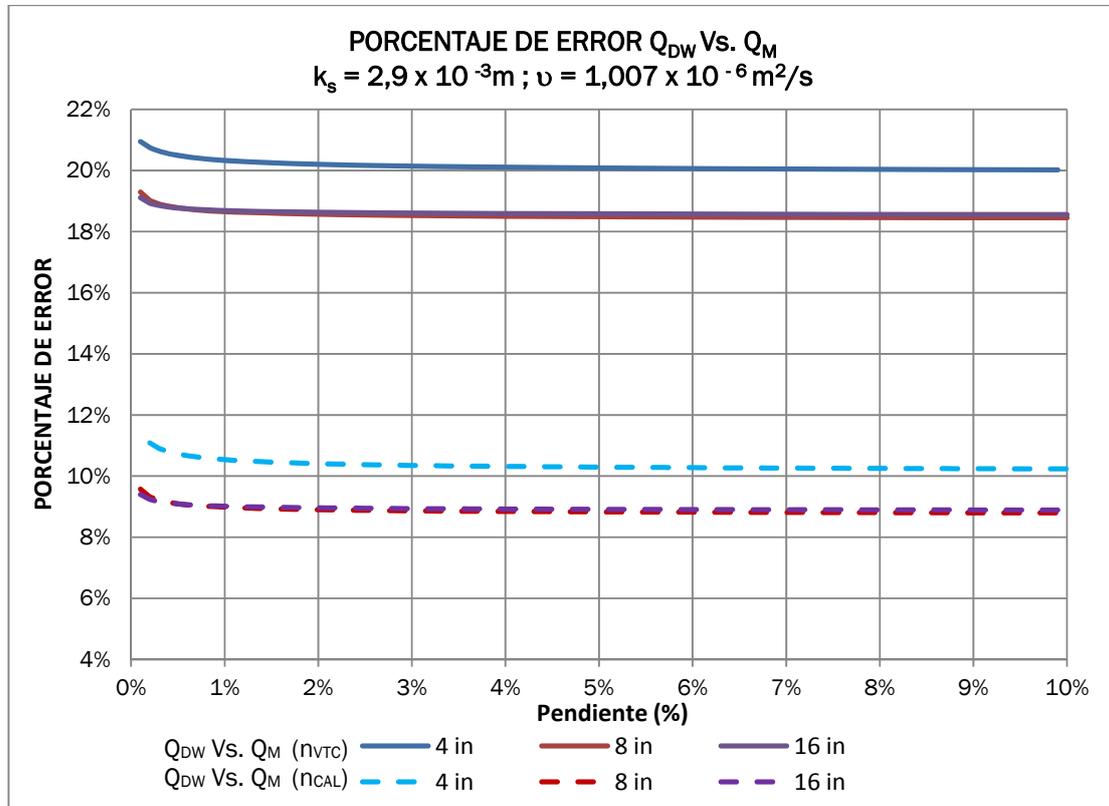


Figura 43. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}), cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$.

En la gráfica anterior se observa que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de “ n_{CAL} ” es menor que cuando se usa el valor de “ n_{VTC} ”, sin importar el diámetro evaluado.

En esta gráfica también se observa que los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes sin importar la pendiente y el diámetro de la tubería. De esta manera para la comparación de Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}) el porcentaje de error promedio es de 18.8%, lo cual significa que para esta comparación el 100% de las combinaciones evaluadas presentan porcentajes de error menores al 25% y mayores al 10%.

Por otro lado, cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) el porcentaje de error promedio es de 9.1%, lo cual significa que para esta comparación prácticamente el 100% de las combinaciones evaluadas presentan porcentajes de error menores al 10% y mayores al 1%.

En las siguientes tablas se puede observar los mayores y menores porcentajes de error encontrados para cada uno de los diámetros evaluados y las dos rugosidades absolutas consideradas cuando se compara Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) y Q_M (n_{CAL}).

Tabla 32. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}).

DIÁMETRO	Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC})			
	Mayor % de Error		Menor % de Error	
	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$
	S=10%	S=0.1%	S=0.1%	S=10%
4"	-31.51%	21.38%	-19.86%	20.02%
6"	-30.33%	19.87%	-20.21%	18.85%
8"	-29.39%	19.30%	-20.19%	18.45%
10"	-28.53%	19.06%	-20.02%	18.33%
12"	-27.73%	19.01%	-19.78%	18.37%
14"	-27.38%	19.03%	-19.65%	18.42%
16"	-26.76%	19.11%	-19.40%	18.56%

Tabla 33. Menores y mayores porcentajes de error encontrados para las dos rugosidades absolutas evaluadas cuando se compara Q_{DW} ($v = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{CAL}).

DIÁMETRO	Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL})			
	Mayor % de Error (S=0.1%)		Menor % de Error (S=10%)	
	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$	$ks=4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$	$ks=2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$
	S=10%	S=0.1%	S=0.1%	S=10%
4"	-37.09%	11.49%	-26.39%	10.24%
6"	-36.01%	10.10%	-26.72%	9.16%
8"	-35.15%	9.57%	-26.69%	8.79%
10"	-34.36%	9.35%	-26.54%	8.68%
12"	-33.62%	9.30%	-26.32%	8.72%
14"	-33.30%	9.32%	-26.20%	8.77%
16"	-32.73%	9.40%	-25.97%	8.89%

De las tablas anteriores se observa que los porcentajes de error encontrados son menores para la mayor rugosidad absoluta considerada para el estudio. Teniendo en cuenta que para el caso evaluado el fluido considerado es el agua a 20°C, se reitera la “validez” de la ecuación de Manning para ductos rugosos por los cuales se conduce este fluido, situación que simula las condiciones experimentales con las cuales Manning dedujo la ecuación en cuestión.

Adicionalmente, los resultados encontrados coinciden con lo reportado por otros investigadores quienes afirman que la ecuación de Manning, suponiendo un “n” que simule adecuadamente la rugosidad absoluta de la tubería, es aceptable en los casos en donde sea suficiente una precisión aproximada del 20%.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta que el objeto del presente estudio es encontrar los errores inducidos por el uso de la ecuación de Manning cuando el fluido transportado a través del sistema de alcantarillados presenta diferentes viscosidades, el análisis de resultados se llevará a cabo en función de cada una de las viscosidades consideradas para el estudio. En la siguiente tabla se observa un resumen de los porcentajes de error obtenidos para cada una de las rugosidades absolutas, viscosidades y diámetros considerados para el estudio, en función de la menor y mayor pendiente evaluada.

Tabla 34. Resumen de resultados obtenidos para cada una de las rugosidades absolutas, viscosidades y diámetros considerados para el estudio.

Viscosidad			3x10 ⁻³ m ² /s		7x10 ⁻⁴ m ² /s		9x10 ⁻⁵ m ² /s		1x10 ⁻⁶ m ² /s	
DIÁMETRO (d) - in	RUGOSIDAD ABSOLUTA (ks) - m	PENDIENTE (S) - %	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{VTC})	Q _{DW} Vs. Q _M (n _{CAL})
4"	4,60E-05	0,2%	4498,73%	4123,84%	281,00%	249,94%	68,15%	54,45%	-22,61%	-28,92%
	2,90E-03		4759,00%	4362,89%	288,34%	256,68%	78,38%	63,84%	20,94%	11,09%
	4,60E-05	10,0%	190,82%	167,11%	71,17%	57,22%	9,50%	0,57%	-31,51%	-37,09%
	2,90E-03		197,80%	173,52%	81,15%	66,38%	32,19%	21,41%	20,02%	10,24%
6"	4,60E-05	0,1%	1523,39%	1391,05%	249,12%	220,66%	67,57%	53,91%	-20,21%	-26,72%
	2,90E-03		1548,67%	1414,27%	254,11%	225,24%	75,81%	61,48%	19,87%	10,10%
	4,60E-05	10,0%	140,54%	120,93%	56,22%	43,49%	5,64%	-2,98%	-30,33%	-36,01%
	2,90E-03		145,98%	125,93%	65,56%	52,07%	28,08%	17,64%	18,85%	9,16%
8"	4,60E-05	0,1%	737,87%	669,57%	199,29%	174,89%	58,60%	45,67%	-20,19%	-26,69%
	2,90E-03		745,20%	676,30%	203,29%	178,57%	66,60%	53,02%	19,30%	9,57%
	4,60E-05	10,0%	118,52%	100,71%	48,83%	36,70%	3,72%	-4,74%	-29,39%	-35,15%
	2,90E-03		123,41%	105,20%	57,98%	45,11%	26,18%	15,89%	18,45%	8,79%
10"	4,60E-05	0,1%	512,95%	462,98%	170,32%	148,28%	52,61%	40,17%	-20,02%	-26,54%
	2,90E-03		517,17%	466,86%	173,83%	151,51%	60,52%	47,43%	19,06%	9,35%
	4,60E-05	10,0%	104,57%	87,89%	43,87%	32,14%	2,46%	-5,89%	-28,53%	-34,36%
	2,90E-03		109,18%	92,12%	52,97%	40,50%	25,02%	14,83%	18,33%	8,68%
12"	4,60E-05	0,1%	404,33%	363,22%	151,01%	130,55%	48,26%	36,18%	-19,78%	-26,32%
	2,90E-03		407,38%	366,02%	154,24%	133,51%	56,15%	43,42%	19,01%	9,30%
	4,60E-05	10,0%	94,76%	78,88%	40,25%	28,82%	1,59%	-6,69%	-27,73%	-33,62%
	2,90E-03		99,20%	82,96%	49,38%	37,20%	24,29%	14,16%	18,37%	8,72%
14"	4,60E-05	0,1%	370,88%	332,49%	144,06%	124,17%	46,63%	34,67%	-19,65%	-26,20%
	2,90E-03		373,61%	335,00%	147,20%	127,05%	54,53%	41,93%	19,03%	9,32%
	4,60E-05	10,0%	91,13%	75,55%	38,89%	27,57%	1,28%	-6,98%	-27,38%	-33,30%
	2,90E-03		95,52%	79,58%	48,04%	35,97%	24,04%	13,93%	18,42%	8,77%
16"	4,60E-05	0,1%	325,04%	290,39%	133,61%	114,57%	44,09%	32,35%	-19,40%	-25,97%
	2,90E-03		327,37%	292,53%	136,62%	117,33%	52,03%	39,64%	19,11%	9,40%
	4,60E-05	10,0%	85,57%	70,44%	36,79%	25,64%	0,82%	-7,40%	-26,76%	-32,73%
	2,90E-03		89,89%	74,41%	46,00%	34,09%	23,72%	13,63%	18,56%	8,89%

4.4.1 $\nu = 3.021 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$: Para todos los diámetros evaluados, la viscosidad de $3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ fue la arrojó los mayores porcentajes de error, resultando incluso caudales negativos para la menor pendiente y menor diámetro considerados ($S=0.1\%$ y $d = 4''$).

Para la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, los errores porcentuales son menores que los encontrados cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. Pese a que la ecuación de Manning es válida para ductos rugosos, en este caso la fuerza viscosa que se opone al flujo es mucho mayor que la presentada en los experimentos realizados por Manning; esto significa que para la aplicación de esta ecuación se debe tener en cuenta no solo la rugosidad absoluta de la tubería sino todas las fuerzas que se oponen al flujo. De esta manera a medida que aumenta la viscosidad del fluido es posible encontrar menores porcentajes de error para tuberías más lisas.

Por otro lado, se observó que el error inducido por el empleo de la ecuación de Manning cuando se usa el valor de " n_{CAL} " es menor que cuando se usa el valor de " n_{VTC} ", sin importar el diámetro evaluado. Esto significa que la aproximación realizada por el cálculo del coeficiente de Manning con la ecuación de Zaghoul, reduce los errores inducidos por la mala escogencia de este coeficiente. Sin embargo, para la viscosidad evaluada no se observaron porcentajes de error menores al 25% para ninguna de las comparaciones realizadas. El menor porcentaje de error que se calculó fue de 70.44% cuando se comparó Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, $d = 16''$ y $S = 10\%$.

Cuando se aplica la ecuación de Manning para un fluido con una viscosidad similar a la evaluada, se presenta un problema de subdimensionamiento de las tuberías, pues al calcular en caudal con la ecuación de Darcy-Weisbach, se encuentra que para la relación de llenado escogida para el estudio (85%) esta se disminuye entre un 97.94% y un 46.11%, cuando se compara con el resultado encontrado al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{VTC} " y entre un 97.76% y un 41.33% cuando se compara con el resultado encontrado al aplicar la ecuación de Manning con el valor de " n_{CAL} ".

Finalmente se encontró que a medida que aumenta el diámetro y la pendiente de la tubería, los porcentajes de error van disminuyendo. Sin embargo, en todos los casos se encontró que al aplicar la ecuación de Manning para un fluido con la viscosidad evaluada, las tuberías se está subdimensionando.

4.4.2 $\nu = 7.005 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$: Los resultados obtenidos para esta viscosidad son similares a los encontrados para la viscosidad anterior en menores proporciones. De acuerdo con lo anterior, en este caso también se presenta que para la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, los errores porcentuales son menores que los encontrados cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. De esta manera el menor porcentaje de error que se calculó fue de 25.64% cuando se comparó Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$, $d = 16''$ y $S = 10\%$.

Para la viscosidad evaluada no se observaron porcentajes de error menores al 25% para ninguna de las comparaciones realizadas.

Al igual que el caso anterior, se encontró que a medida que aumenta el diámetro y la pendiente de la tubería, los porcentajes de error van disminuyendo. Sin embargo, en todos los casos se encontró que al aplicar la ecuación de Manning para un fluido con la viscosidad evaluada, las tuberías se está subdimensionando, pues al calcular en caudal con la ecuación de Darcy-Weisbach, se encuentra que para la relación de llenado escogida para el estudio (85%) esta se disminuye entre un 74.25% y un 26.89%, cuando se compara con el resultado encontrado al aplicar la ecuación de Manning con el valor de “ n_{VTC} ” y entre un 71.96% y un 20.40% cuando se compara con el resultado encontrado al aplicar la ecuación de Manning con el valor de “ n_{CAL} ”.

4.4.3 $\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$: Para esta viscosidad se encontraron porcentajes de error menores al 25% en la mayoría de las combinaciones de diámetro y pendiente consideradas cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) para la rugosidad absoluta de $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. tal y como se muestra a continuación:

- Para el diámetro de 4” el 24% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 70% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 6% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%
- Para el diámetro de 6” el 14% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 46% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 40% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%
- Para el diámetro de 8” el 10% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 36% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 54% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%
- Para el diámetro de 10” el 7% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 30% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 63% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%
- Para el diámetro de 12” el 6% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 26% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 68% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%
- Para el diámetro de 14” el 5% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 25% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, y el 70% de las pendientes evaluadas presentan errores entre el 10 y el 1%

- Para el diámetro de 16" el 5% de las pendientes evaluadas presentan errores mayores al 25%, el 22% de las pendientes evaluadas presentan errores entre 25% y 10%, el 69% de las pendientes presentan errores entre en 10% y el 1%, y 4% de las pendientes presentan errores menores al 1%.

Como se observa en la Tabla 30 del Numeral 4.3.3 del presente documento, existe una pendiente óptima para cada diámetro, en la cual el porcentaje de error es cercano al 0% cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m. Esta pendiente es única para cada diámetro por lo que solo en ese caso puntual la aplicación de la ecuación de Manning no induce a un error en el cálculo de la capacidad hidráulica de la tubería. No obstante no es posible afirmar que para esta viscosidad la ecuación de Manning puede ser aplicada.

De esta manera, cuando a través de una tubería nueva de acero al carbón se conduce un fluido con una viscosidad similar a la evaluada, la ecuación de Manning permite hacer solo un diseño aproximado, con porcentajes de error que pueden estar entre un 25% y un 0.01% teniendo en cuenta que para cada diámetro existe una pendiente a partir de la cual es posible encontrar este rango de errores porcentuales.

Los porcentajes de error encontrados son mayores cuando se realiza la comparación para la mayor rugosidad absoluta considerada para el estudio (2.9×10^{-3} m). Para este caso aplica la misma explicación dada cuando se llevó a cabo el análisis de resultados para la viscosidad de 3.021×10^{-3} m²/s (Numeral 4.4.1 del presente documento).

Para las dos rugosidades absolutas evaluadas se encuentra que cuando se emplea el valor de "n" recomendado por Vent T. Chow (n_{VTC}) se encuentran mayores porcentajes de error que cuando se hace uso del valor de "n" calculado con la ecuación de Zaghoul (n_{CAL}).

Al igual que los dos casos anteriores, cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}), se encontró que a medida que aumenta el diámetro y la pendiente de la tubería, los porcentajes de error van disminuyendo. Para esta comparación las tuberías se siguen subdimensionando, pues al calcular en caudal con la ecuación de Darcy-Weisbach, se encuentra que para la relación de llenado escogida para el estudio (85%) esta se disminuye entre un 40.53% y un 0.81%.

Por otro lado cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}), se observa que a medida que aumenta la pendiente el porcentaje de error va disminuyendo hasta encontrar un rango de pendientes en el cual este es menor del 1%. Después de este rango, este porcentaje se vuelve negativo y comienza a aumentar. Este rango se desplaza hacia pendientes menores a medida que aumenta el diámetro de la tubería.

Porcentajes de error positivos significan un subdimensionamiento de las tuberías, mientras que porcentajes de error negativos refieren un sobredimensionamiento de las mismas. Como se mencionó con anterioridad, en el estudio se encontró que cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$ para $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m, cada diámetro tiene una pendiente para la cual el porcentaje de error es mínimo (ver Tabla 30). A partir de esta pendiente a medida que aumenta la misma, el porcentaje de error comienza a ser negativo y aumentar tomando este como un valor absoluto. En la siguiente figura se muestra lo comentado:

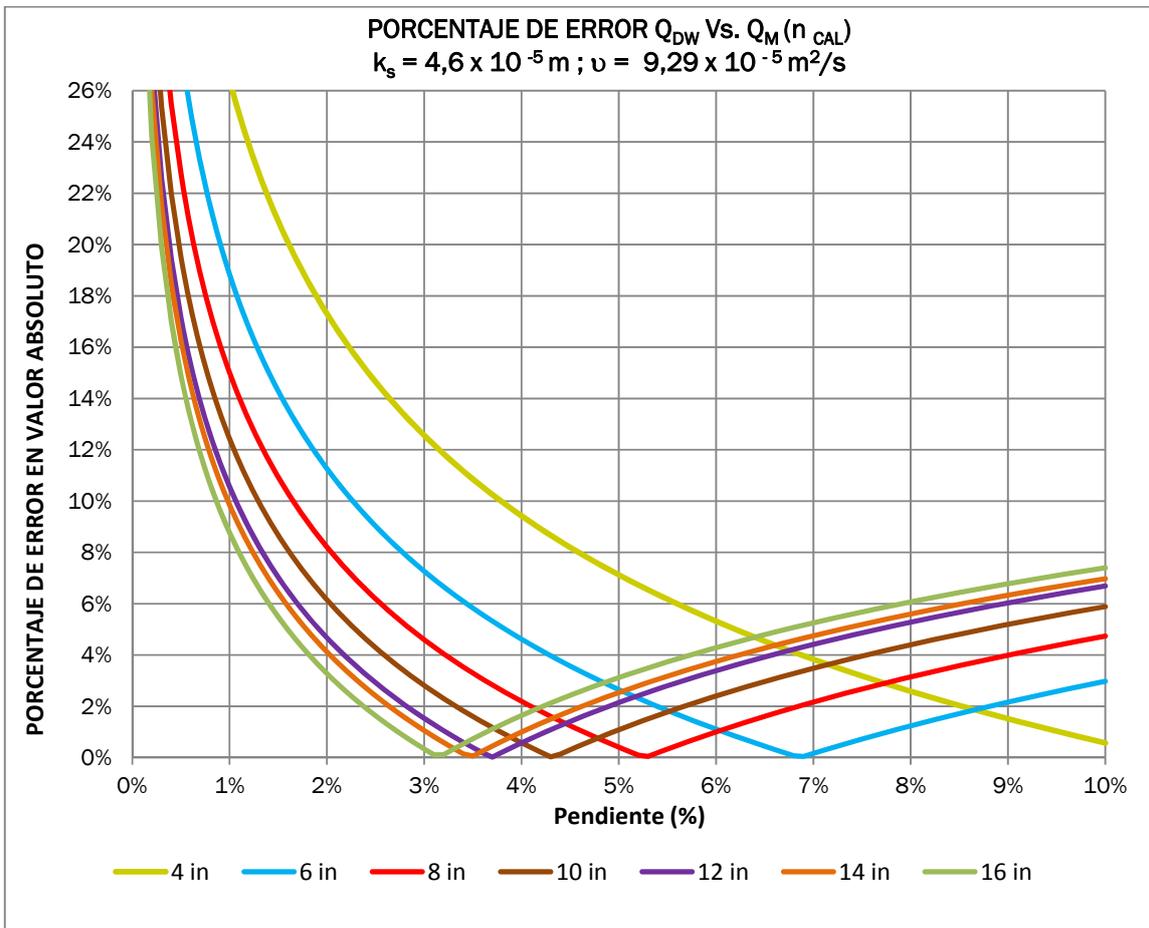


Figura 44. Valor absoluto de los porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5}$ m²/s) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5}$ m.

4.4.4 $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$ m²/s: Dado que Manning llevó a cabo sus experimentos con agua, para la viscosidad en cuestión, la cual es equivalente a la del agua a 20°C, contrario a lo arrojado con las tres anteriores viscosidades, los resultados del estudio demostraron que los menores porcentajes de error se obtienen con la mayor rugosidad absoluta evaluada

(2.9×10^{-3} m). Esto se debe a que como se mencionó con anterioridad, la ecuación de Manning es válida para superficies bastante rugosas.

Como se observa en la Figura 42 del Numeral 4.3.4 del presente documento, los porcentajes de error encontrados para todas las pendientes y diámetros evaluados resultan ser negativos, lo cual significa que al hacer uso de la ecuación de Manning, se está sobredimensionando el sistema pues la tubería en realidad tiene mayor capacidad hidráulica.

Contrario a lo que sucedió al hacer el análisis para las mayores viscosidades, para este caso el menor porcentaje de error se obtiene para el menor diámetro y la menor pendiente considerada para el estudio ($d=4''$ y $S=0.1\%$).

Cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}) para $ks = 4.6 \times 10^{-5}$ m, se encuentra que para ningún caso se presentan porcentajes de error menores al 25%. Por otro lado cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}), se encuentra que solo entre un 4% y un 15% de los casos evaluados presentan porcentajes de error del 25%.

Para la rugosidad de 2.9×10^{-3} m, se observa que los porcentajes de error permanecen prácticamente constantes sin importar la pendiente y el diámetro de la tubería. Estos son positivos lo cual implica un subdimensionamiento de los sistemas el cual puede estar entre un 17.82% y un 15.65% cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{VTC}), y entre un 9.78% y un 8.17% cuando se compara Q_{DW} Vs. Q_M (n_{CAL}).

Cuando se uso el valor de “n” recomendado por Ven T. Chow, los porcentajes de error se encuentran entre 21.38% y 18.38%, mientras que si se usa un valor de “n” calculado con la ecuación de Zaghoul este porcentaje de error se reduce desde un 11.5% hasta un 8.68%.

Lo anterior coincide con lo reportado por otros investigadores quienes afirman que la ecuación de Manning, suponiendo un valor de “n” que simule adecuadamente la rugosidad absoluta de la tubería, es aceptable en los casos donde no se requiera una precisión mayor al 20%.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Una de las mayores dificultades de la aplicación de la fórmula de Manning reside en la determinación del coeficiente n , pues no hay un método exacto para seleccionar este valor. Es muy común pensar que el n de Manning es constante para todas las condiciones de flujo y para todo tipo de fluidos, y a menudo se considera que el único factor importante para la selección de este coeficiente es la rugosidad de la superficie. Sin embargo, pese a que se ha demostrado en diversas investigaciones que la ecuación de Manning es válida para superficies rugosas, el presente estudio confirma que el mencionado coeficiente debe calcularse no solo en función de la rugosidad de la superficie y el porcentaje de lleno del ducto, sino que también se debe tener en cuenta que al igual que las fuerzas de fricción, las fuerzas viscosas se oponen al flujo y estas son importantes al momento de escoger un adecuado “ n ” de Manning.
- Nuevamente se demuestra la dependencia del coeficiente de Manning con la relación de llenado de la tubería, pues para todos los casos evaluados los resultados arrojaron menores porcentajes de error cuando se aplicó la ecuación de Manning con el valor de “ n ” calculado por medio de la ecuación de Zaghoul.
- Los mayores porcentajes de error se encontraron al evaluar la mayor viscosidad cinemática ($3.021 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) y la mayor rugosidad absoluta ($2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$) considerados para el estudio.
- Para las viscosidades de 3.021×10^{-3} y $7.005 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ se encontraron problemas de subdimensionamiento de los sistemas de alcantarillado pues cuando se calcula el caudal que es capaz de transportar la tubería aplicando la ecuación de Manning este resulta ser mayor que el que se calcula aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la de Colebrook-White. Este subdimensionamiento resulta ser más crítico entre menor es el diámetro y la pendiente de la tubería. Para estas dos viscosidades los menores porcentajes de error se encontraron al comparar Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, para $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. Para ninguna de las combinaciones de diseño realizadas para estas dos viscosidades se encontraron porcentajes de error menores al 25%.
- Para la viscosidad $9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, los porcentajes de error son menores al 25% en la mayoría de las combinaciones de diseño realizadas al comparar Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, para $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. Se encontró que para esta comparación existe una pendiente óptima, en la cual el porcentaje de error es cercano al 0%. Sin embargo, esta pendiente es única para cada diámetro por lo que solo en ese caso puntual la aplicación de la ecuación de Manning no induce a un error en el cálculo de la capacidad hidráulica de la tubería. No obstante no es posible afirmar que para esta viscosidad la ecuación de Manning puede ser usada sin inducir a errores por su aplicación.

- Los ingenieros que se muestran renuentes a la aplicación de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, podrían hacer uso de la ecuación de Manning para el diseño de sistemas de alcantarillado cuando por a través de este se conduce un fluido con una viscosidad cercana a $9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:
 - ✓ Siempre es recomendable emplear un “ n ” de Manning calculado mediante la aplicación de ecuaciones empíricas que relacionan el porcentaje de llenado de la tubería con el mencionado coeficiente.
 - ✓ Para este caso en particular, una alta rugosidad absoluta de la tubería aumenta el porcentaje de error inducido por el uso de la ecuación de Manning, Por lo tanto es más recomendable aplicar la misma para tuberías poco rugosas cuando la viscosidad del fluido es similar a la evaluada.
 - ✓ Incluso atendiendo las dos recomendaciones anteriormente mencionadas, se debe tener en cuenta que siempre existe un error asociado con el uso de la ecuación de Manning que implica un subdimensionamiento o un sobredimensionamiento del sistema de alcantarillado, dependiendo esto del diámetro y la pendiente de la tubería a emplear. Esto induce a errores porcentuales que pueden ser menores al 25% en el 90% de los casos, teniendo en cuenta que para diámetros pequeños (menores a 8”) y pendientes bajas (menores al 1%) estos errores pueden ser mayores al mencionado.
- Cuando se compara Q_{DW} Vs. $Q_M (n_{CAL})$, para $ks = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ y $\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, se encuentran porcentajes de error positivos para pendientes bajas que significan subdimensionamiento de las tuberías, un pequeño rango de pendientes las cuales presentan errores porcentuales menores al $\pm 1\%$, y para pendientes mayores los porcentajes de error resultan ser negativos, lo cual indica un sobredimensionamiento de los sistemas.
- Para la viscosidad de $1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ se reitera lo encontrado en estudios anteriores, los cuales indican que al hacer uso de la ecuación de Manning se induce en un error cercano al 20%. Sin embargo, es posible reducir este porcentaje de error hasta aproximadamente 10% si se hace uso de ecuaciones empíricas que relacionen el “ n ” con la relación de llenado de la tubería.
- Se recomienda desarrollar pruebas experimentales que validen los resultados obtenidos con el presente estudio.
- Se recomienda continuar con este estudio para encontrar un algoritmo que incluya como variable para el cálculo del n de Manning la viscosidad del fluido. Esto a fin de dar a los diseñadores que se muestran renuentes a emplear las ecuaciones de Darcy-

Weisbach y Colebrook-White mejores herramientas que ayuden a disminuir por porcentajes de error inducidos por el uso de la ecuación de Manning.

- Se recomienda utilizar la fórmula de Darcy- – Weisbach en combinación con la ecuación de Colebrook – White, las cuales permiten una mejor estimación de la velocidad y caudal, representando de mejor manera las condiciones de rugosidad a través del coeficiente k_s y las características del fluido a través de la viscosidad cinemática del mismo (ν).

6 BIBLIOGRAFÍA

Ackers, P. (1961). The Hydraulic Resistance of Drainage Conduits. Proceedings Instn Civil Engineers, Vol 19, Julio , 307-336.

American Society of Civil Engineers. (2007). Gravity Sanitary Sewer Design and Construction (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 60) (2nd ed.). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

American Society Of Mechanical Engineers. (2011) Process Piping, Third Edition. ASME B31.3.

ASTM A53 / A53M - 10 Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless

Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. (J. G. Saldarriaga, Trad.) Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.

Martinez, D. (2011). Estudio sobre la Precisión y Magnitud de Errores Inducidos en un Diseño de Redes de Drenaje Urbano por el Uso de la Ecuación de Manning vs la Ecuación de Darcy--Weisbach. Santafé de Bogotá: Universidad de los Andes.

Hager, W., Wong, T., & Akgiray, Ö. (2006). Discussion of "Explicit solutions of the Manning equation for partially filled circular pipes". Canadian Journal of Civil Engineering , 33 (3), 347-354.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tubos de acero soldados y sin costura, negros y recubiertos de cinc por inmersión en caliente. Bogotá: ICONTEC, 2010 (NTC 3470)

Powell, R. (1960). History of Manning's Formula. Journal of Geophysical Research, 65 (4), 1310-1311.

Saldarriaga, J. (2007). Hidráulica de Tuberías. Santafé de Bogotá: Alfaomega.

Saldarriaga, J. (2010). Notas Curso "Drenaje Urbano". Santafé de Bogotá: UNIANDES.

Swaffield, J. A., & Bridge, S. (1983). Applicability of the Colebrook-White Formula to Represent Frictional Losses in Partially Filled Unsteady Pipeflow. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards , 88 (6), 389-393.

VENUTELLI, Mauricio. (2005) A Constitutive Explanation of Manning's Formula. En: Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa, Vol 40, Marzo, 281-289.

Zaghloul, N. (1997). Unsteady gradually varied flow in circular pipes with variable roughness. Advances in Engineering Software , 28 (2), 115-131.

7 ANEXOS

7.1 GRÁFICAS DEL PORCENTAJE DE ERROR DEL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE MANNING VS. EL CAUDAL CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE DARCY – WEISBACH (k_s Y v CONSTANTES), PARA TODOS LOS DIÁMETROS EVALUADOS.

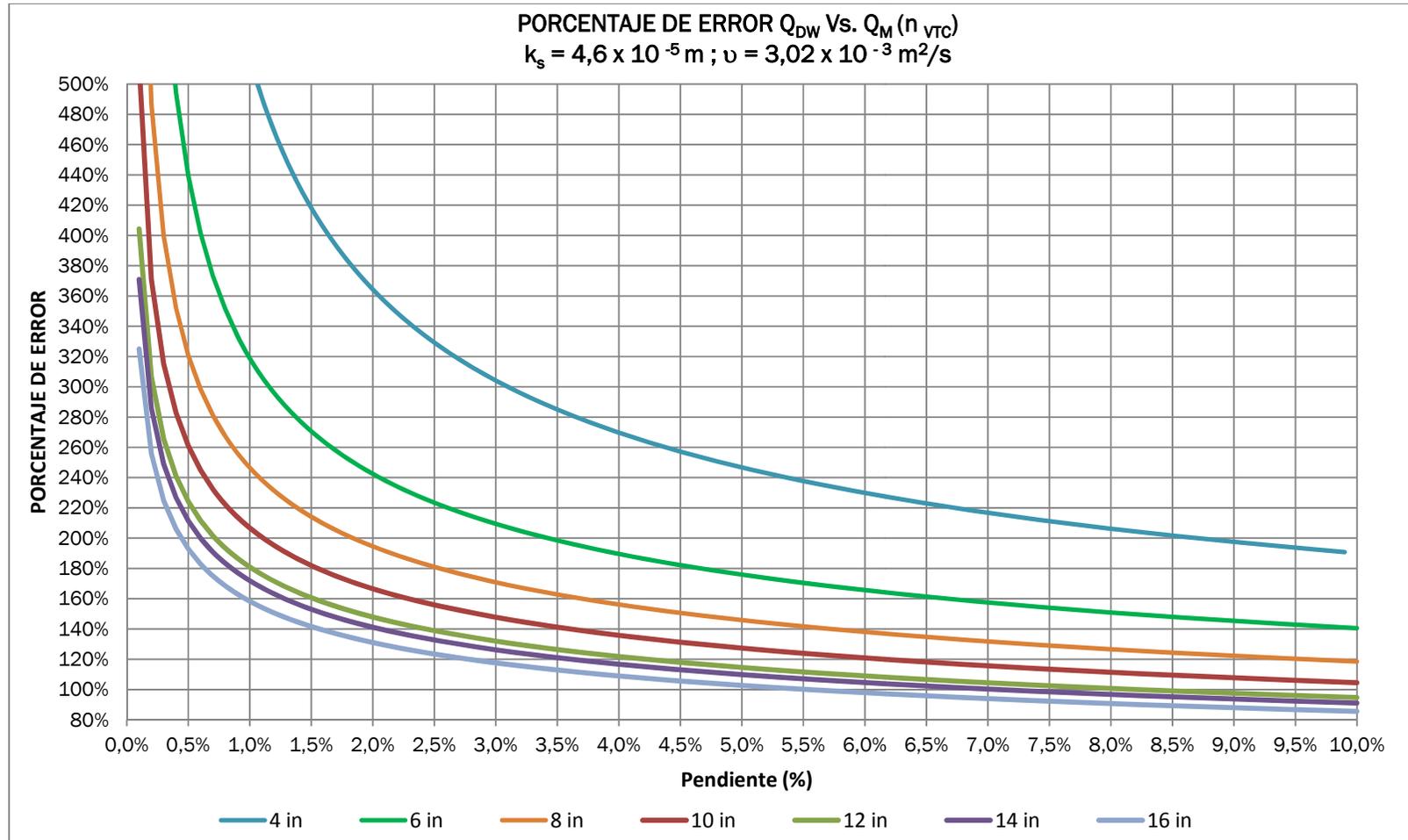


Figura 45. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

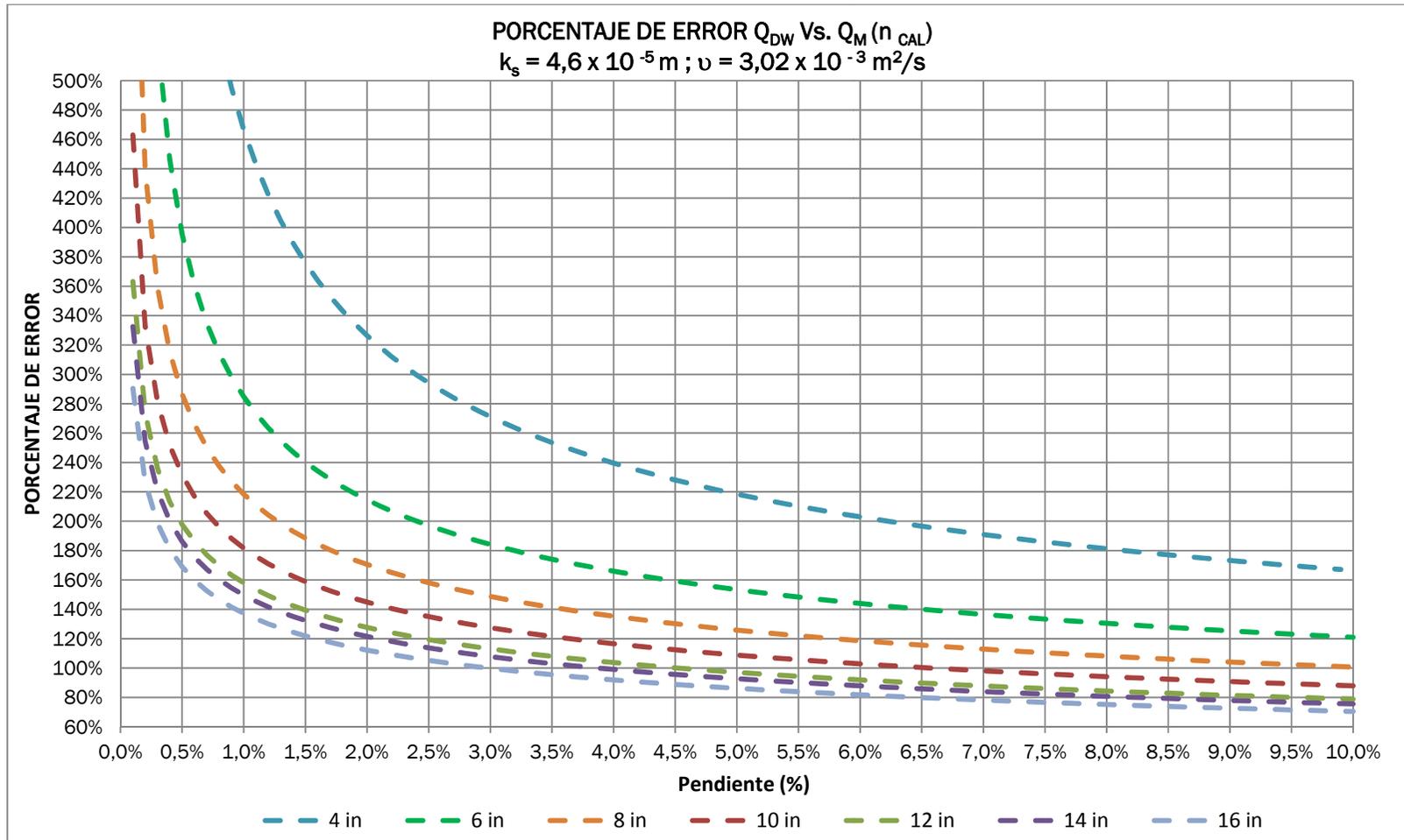


Figura 46. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

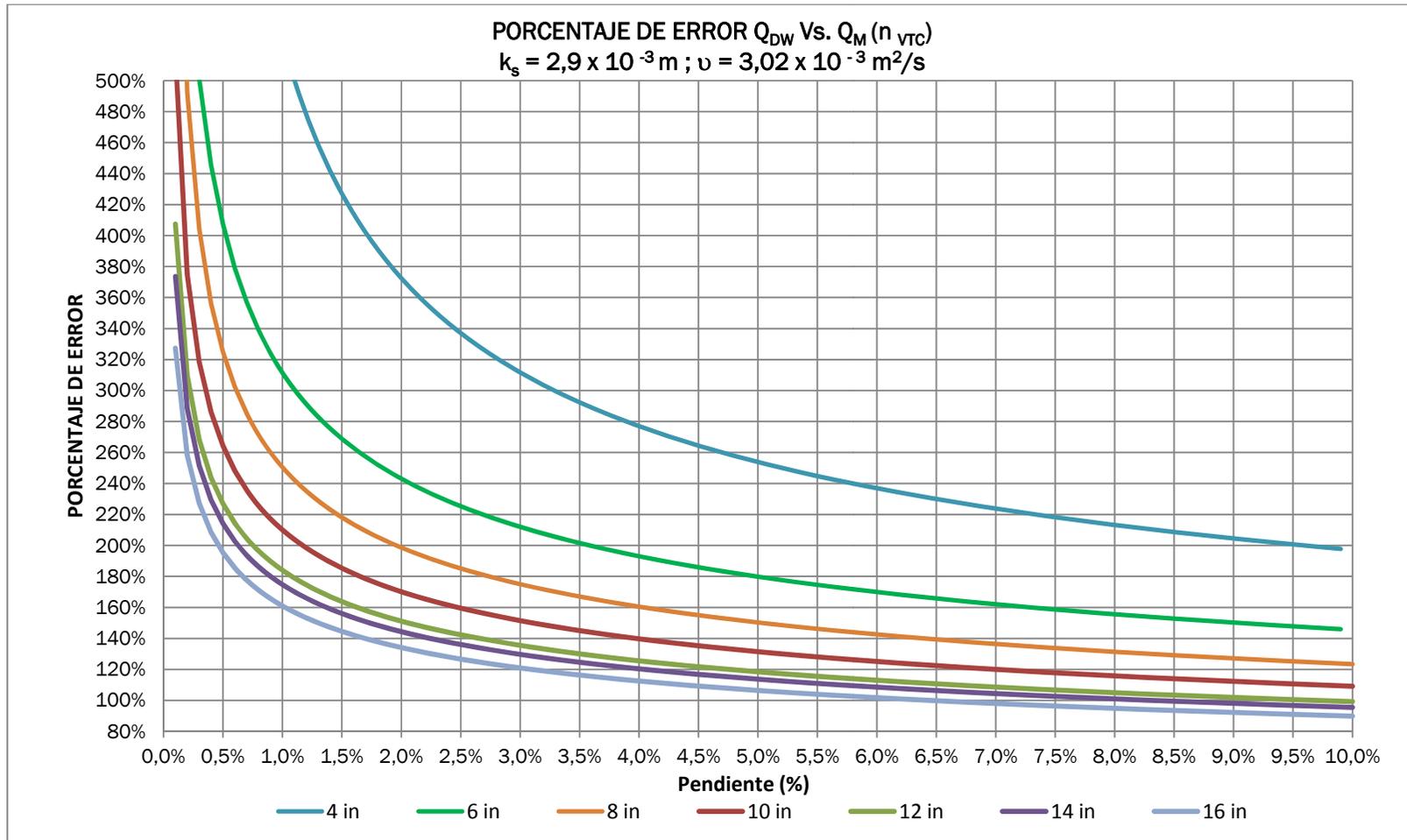


Figura 47. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

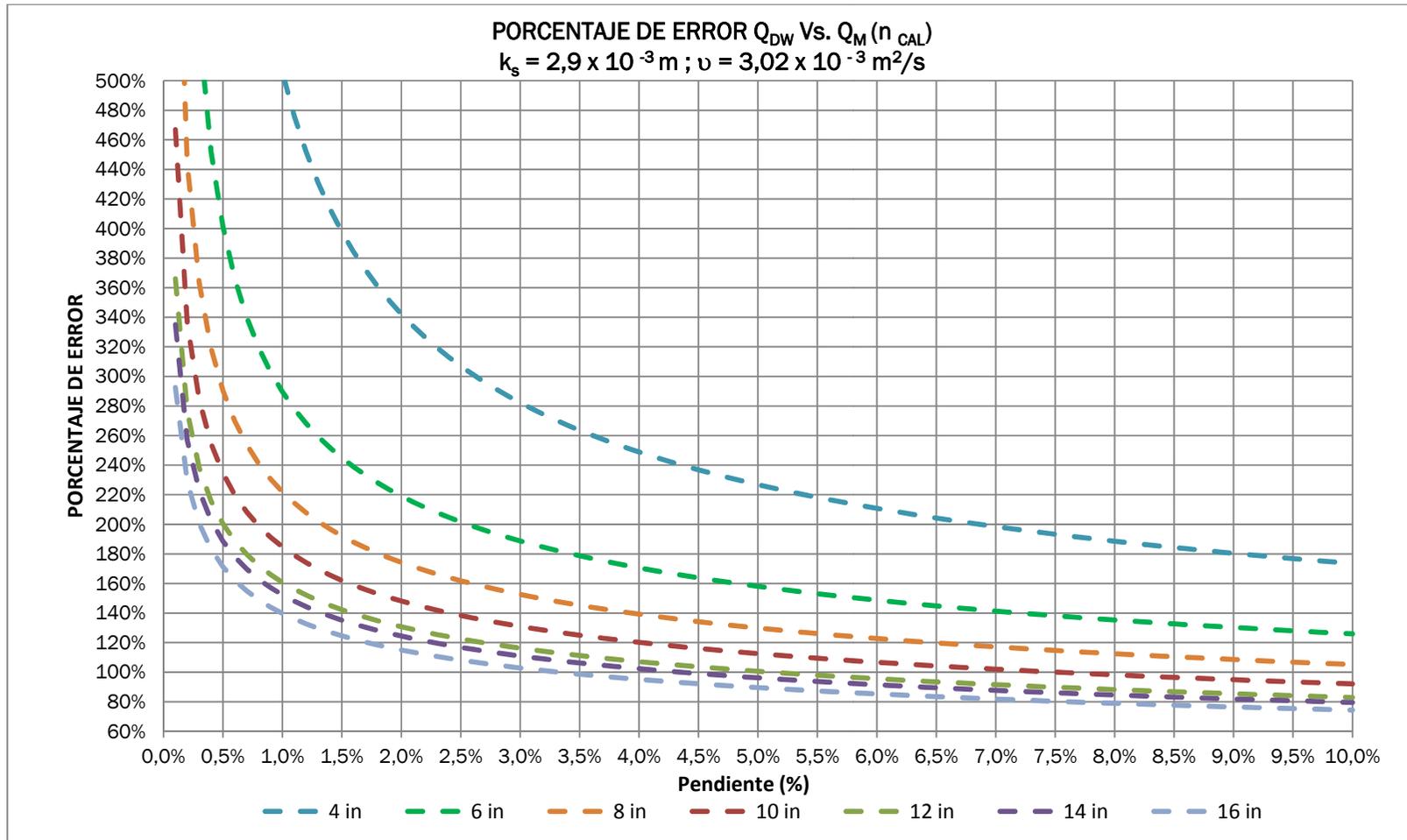


Figura 48. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

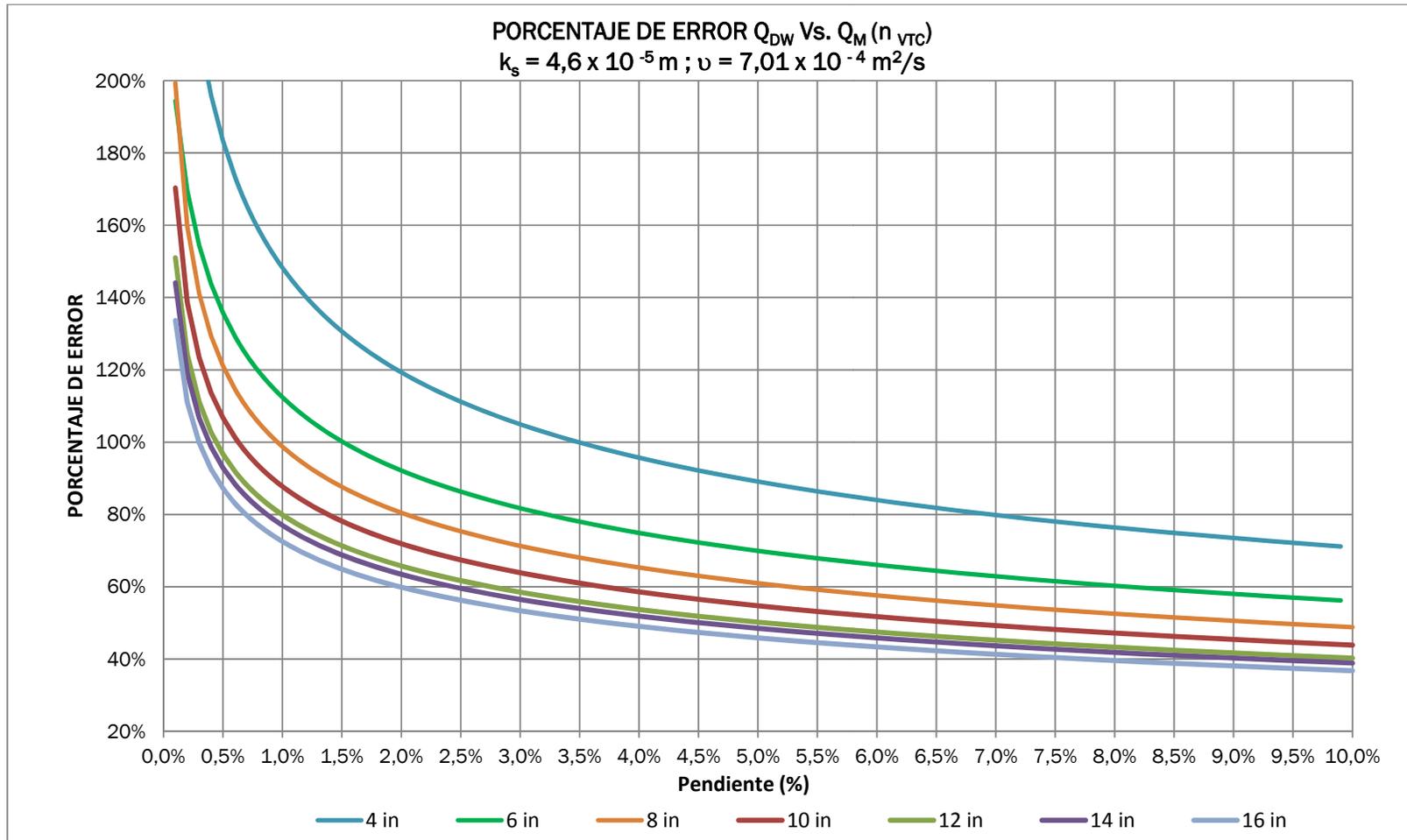


Figura 49. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

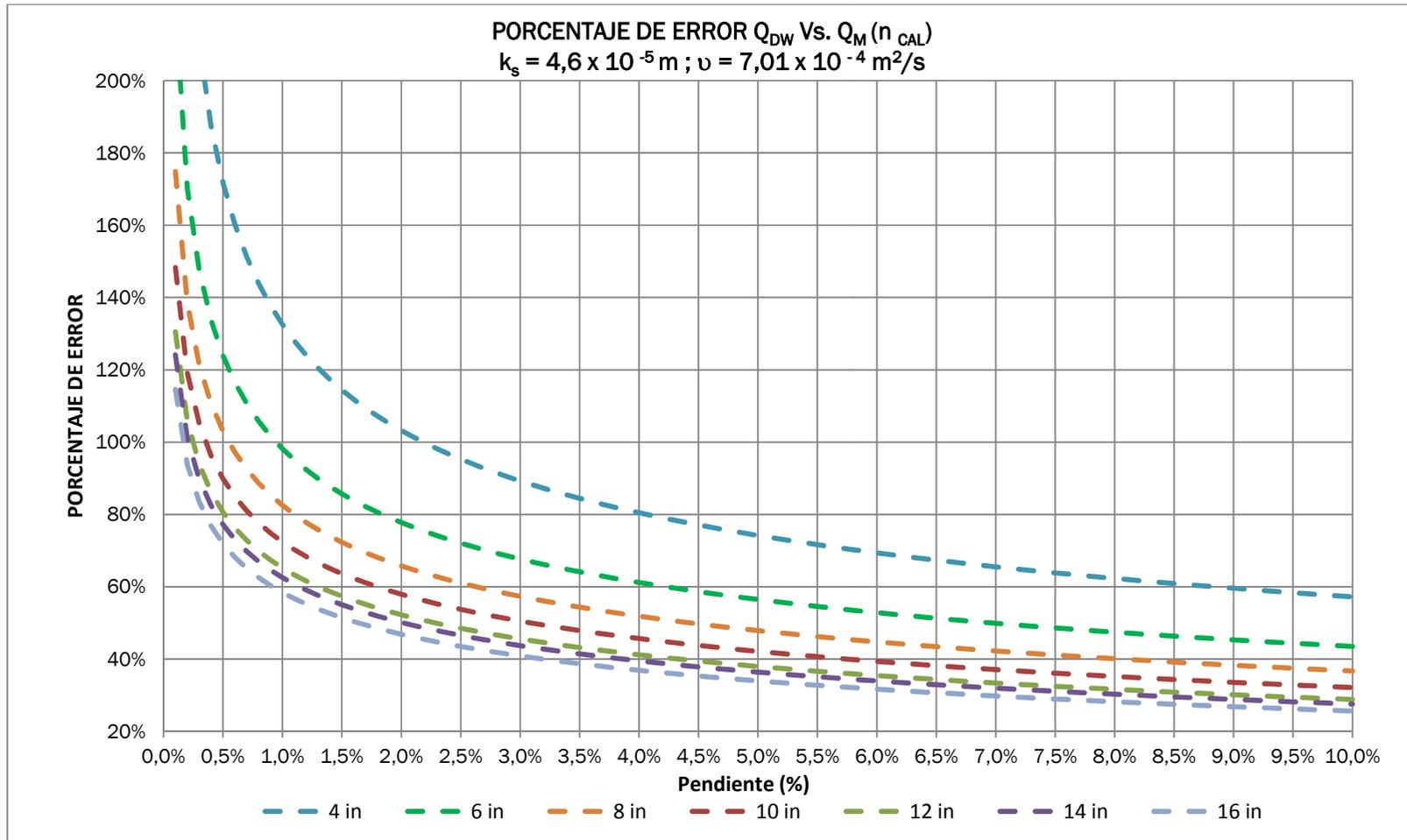


Figura 50. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$, cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

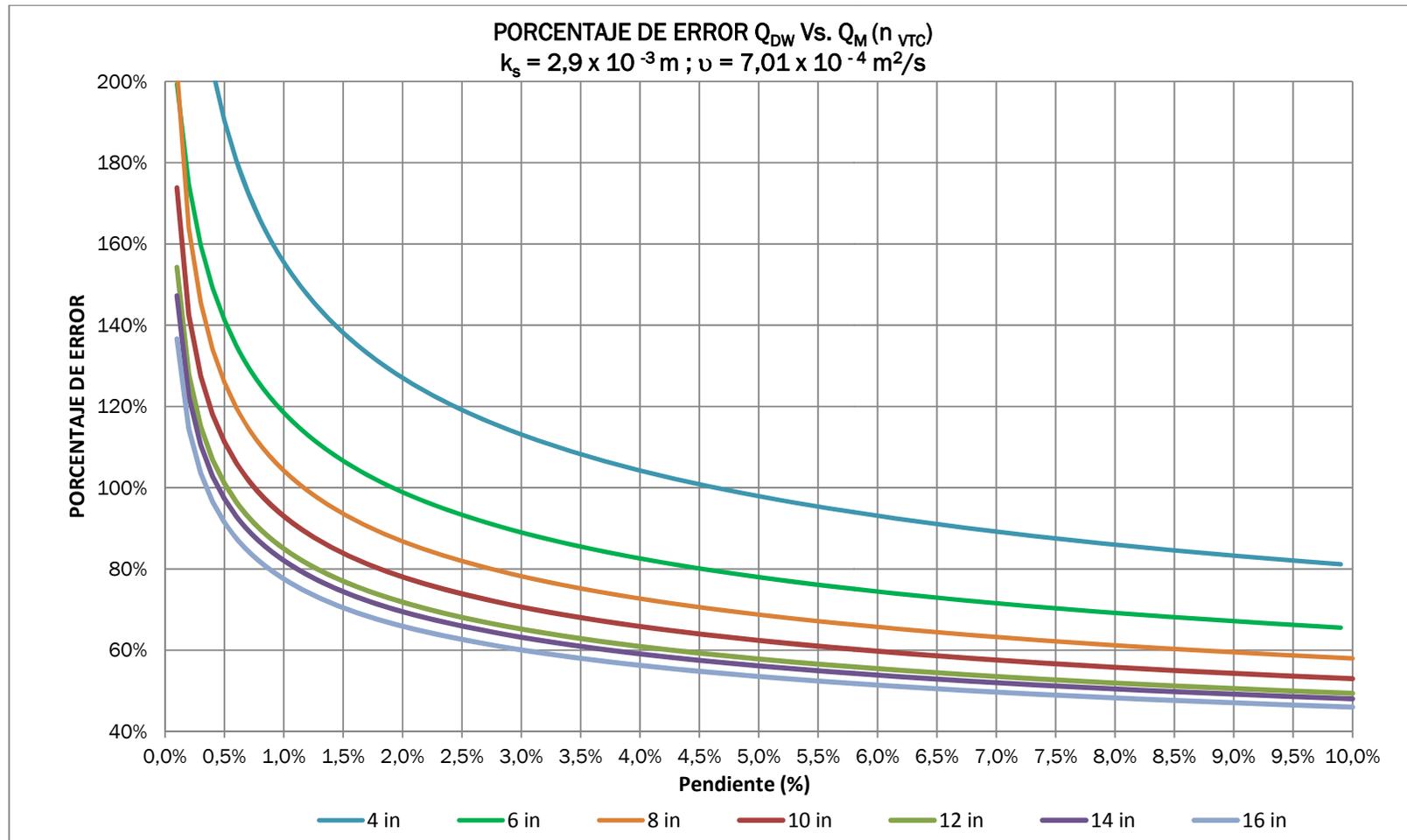


Figura 51. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$, cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

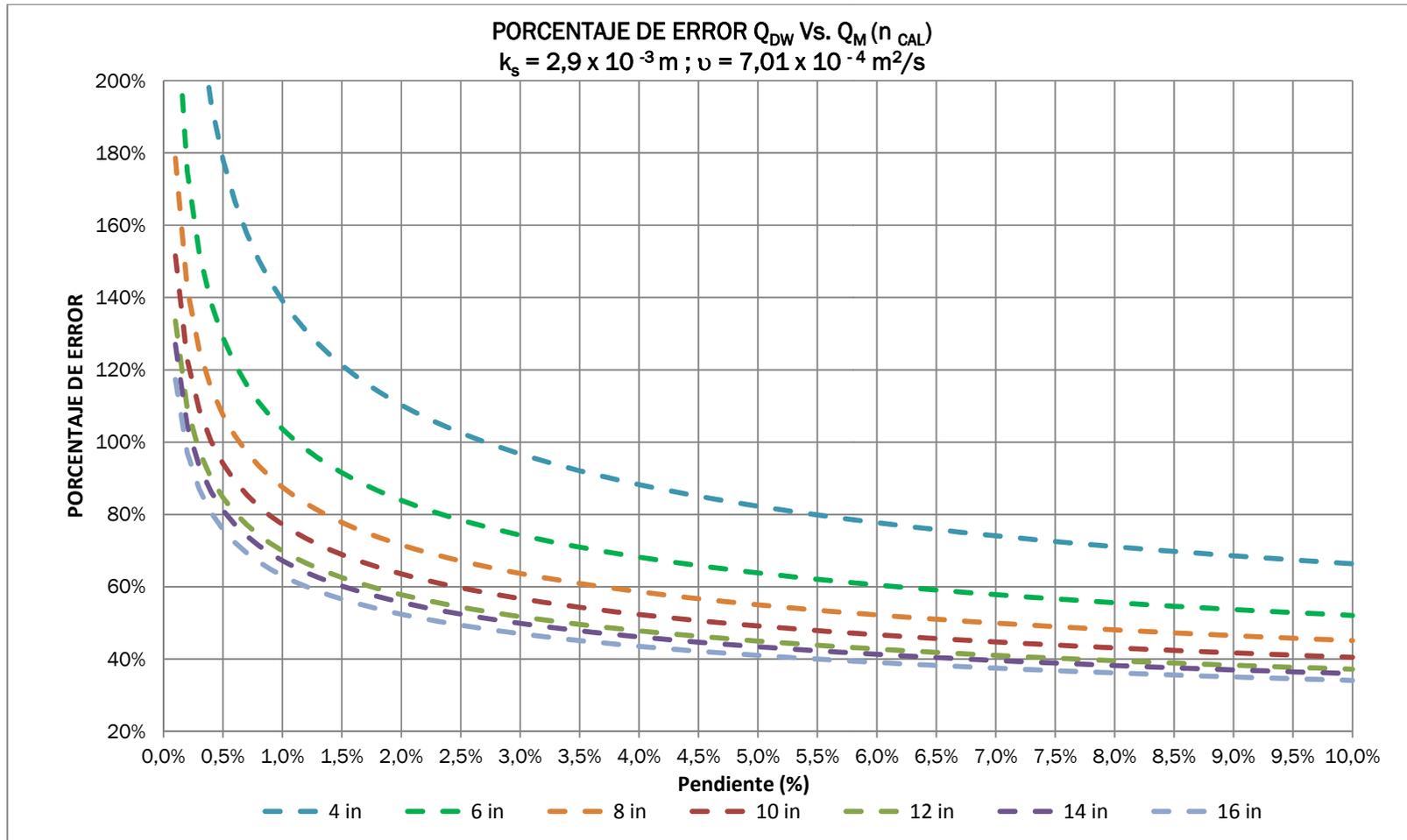


Figura 52. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 7.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M(n_{CAL})$, cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

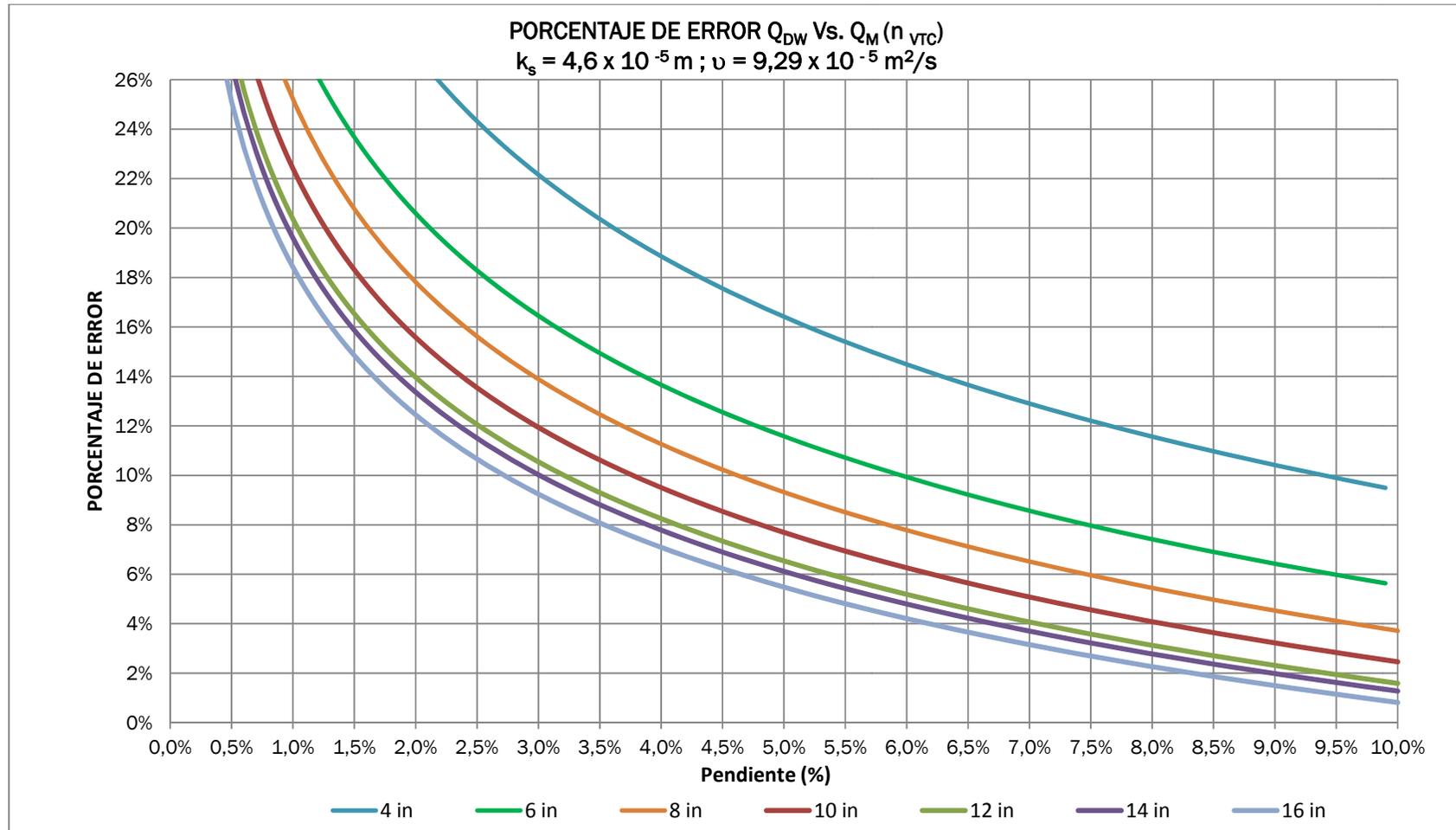


Figura 53. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. Q_M (n_{VTC}) cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

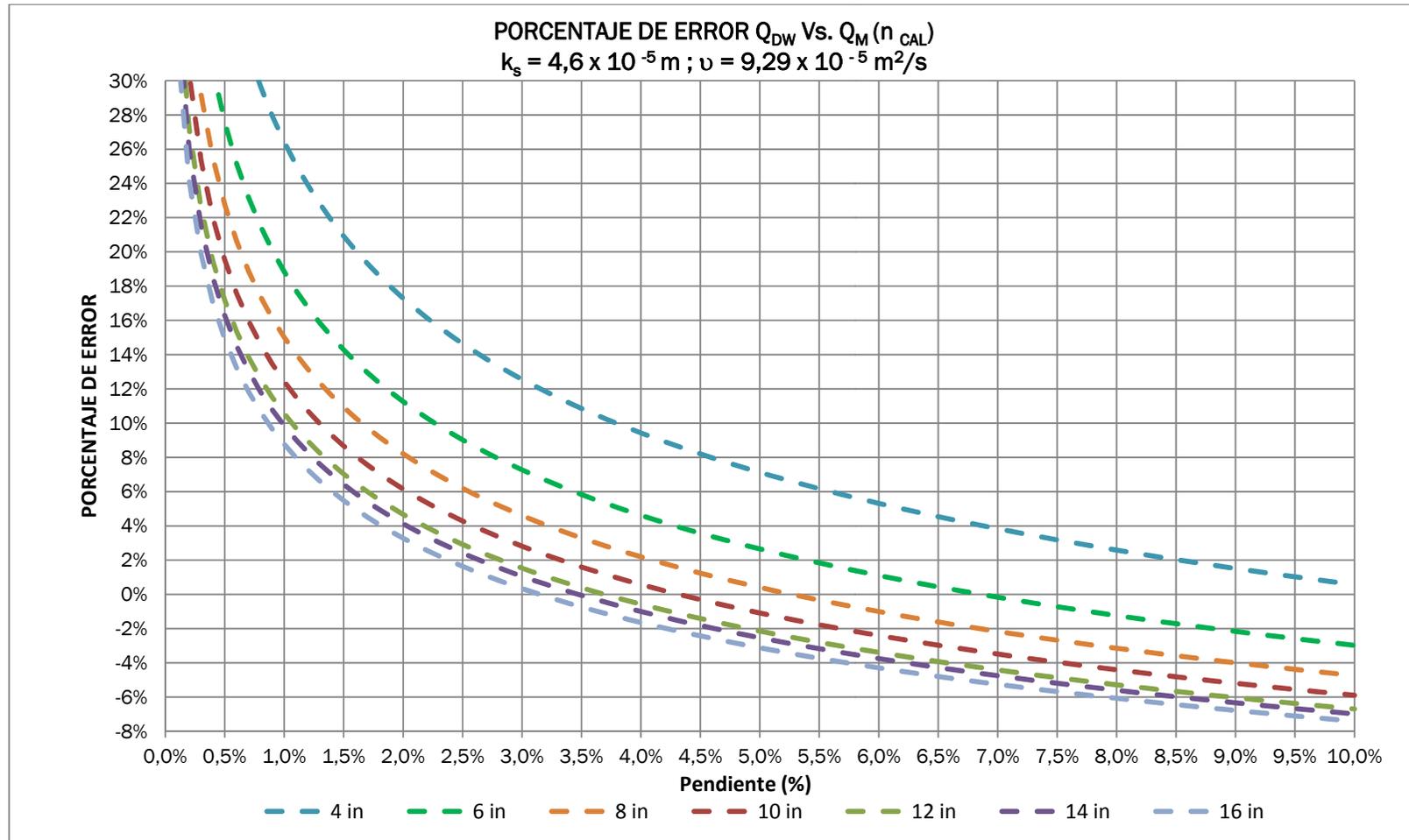


Figura 54. Porcentaje de error Q_{DW} ($v = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

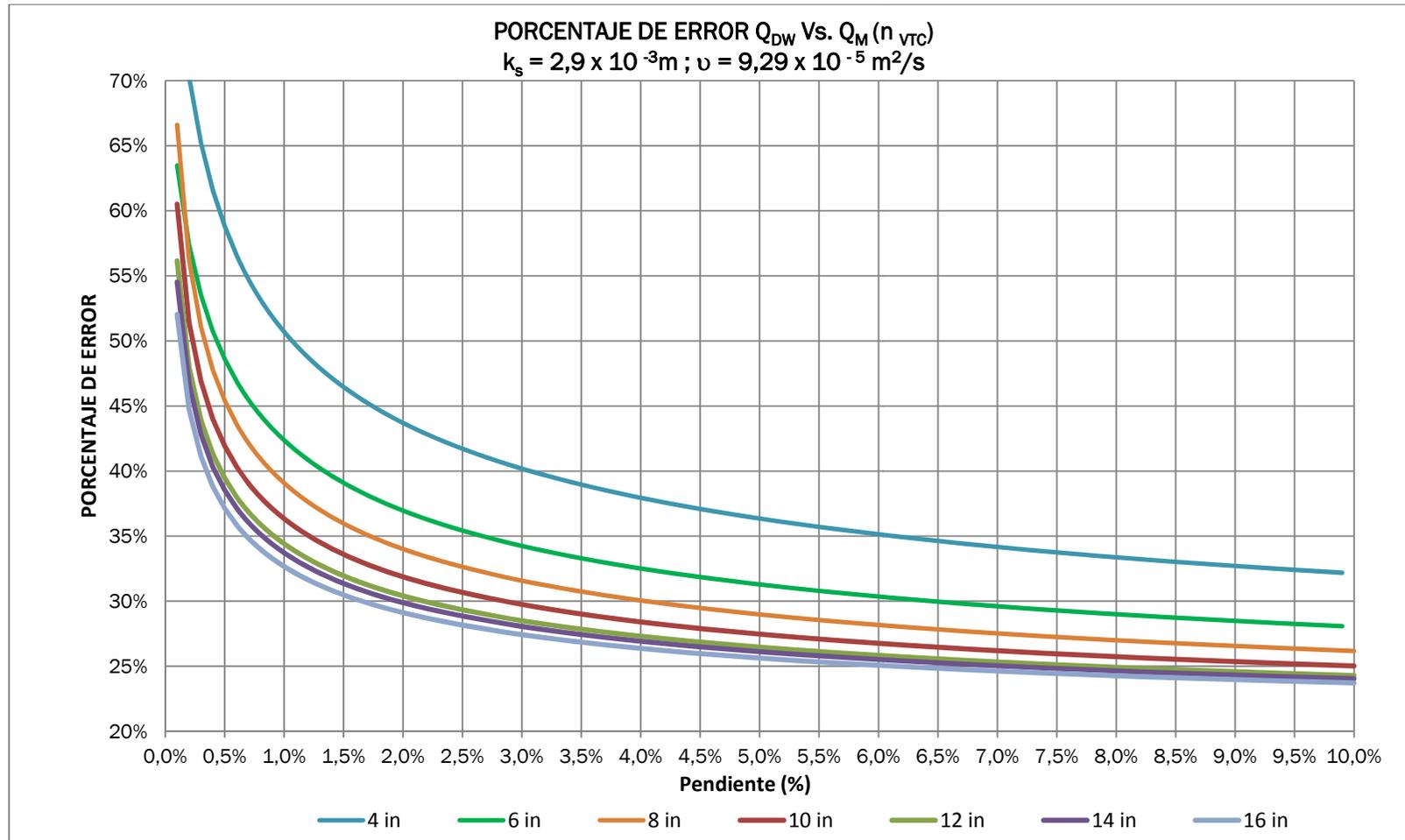


Figura 55. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

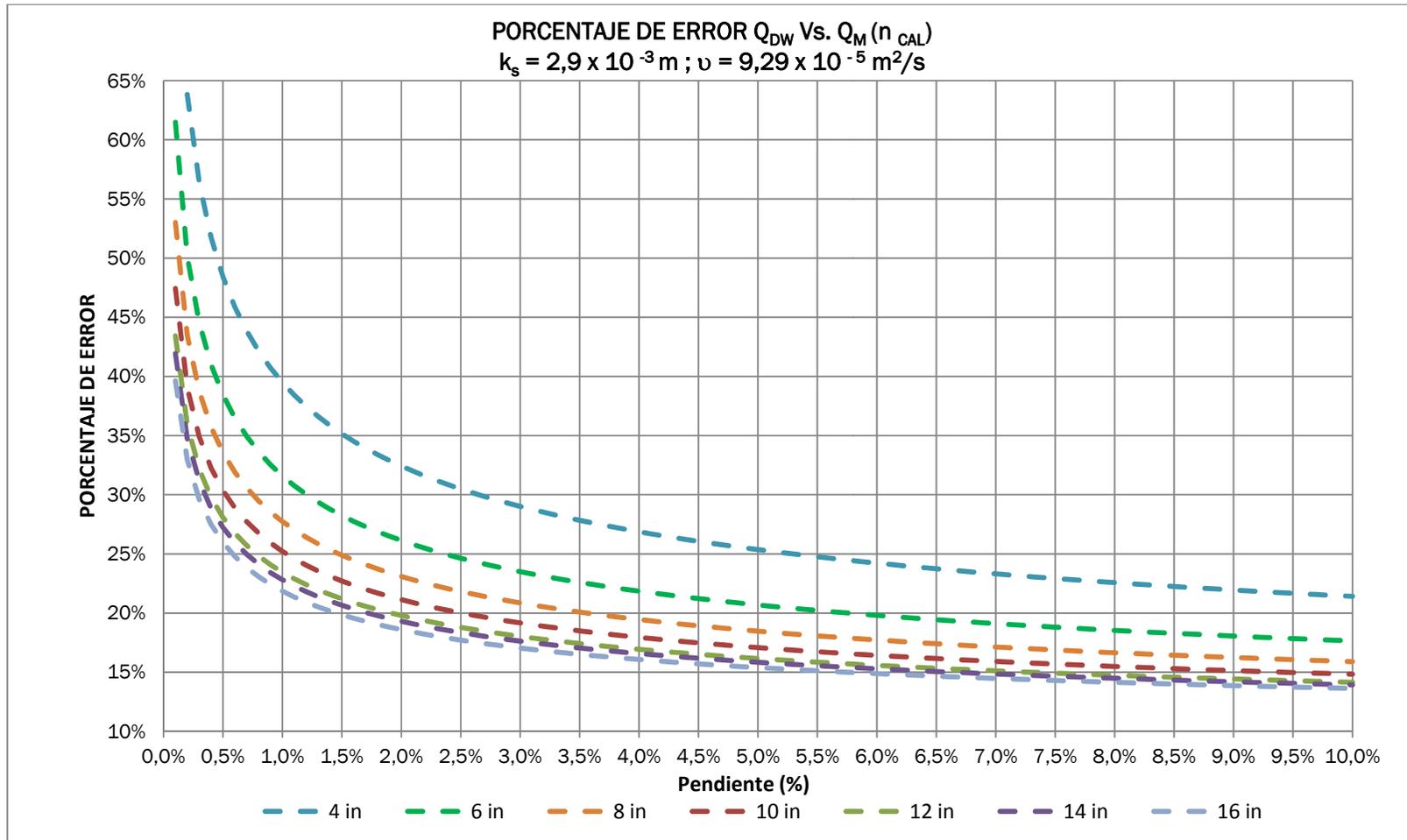


Figura 56. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 9.29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

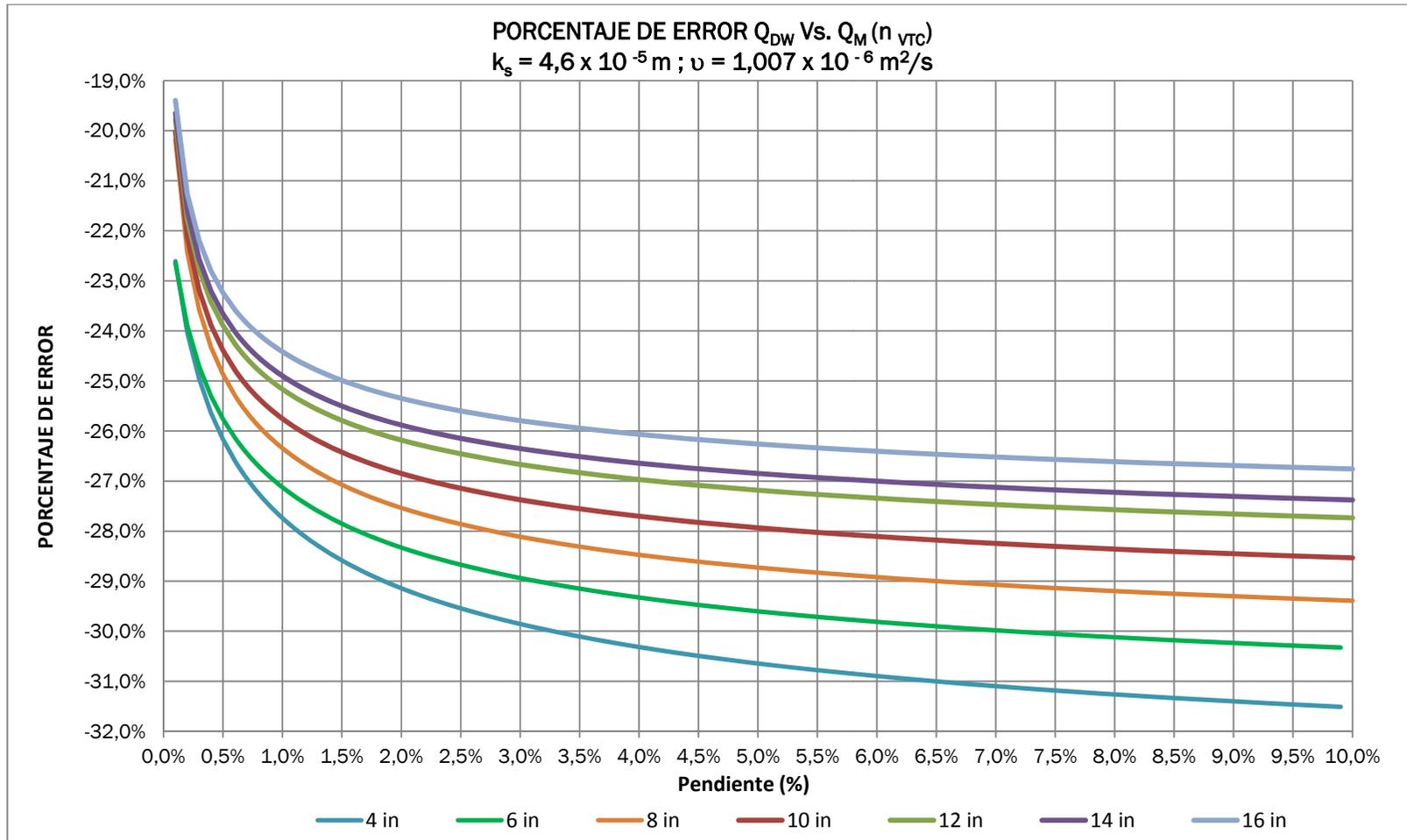


Figura 57. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

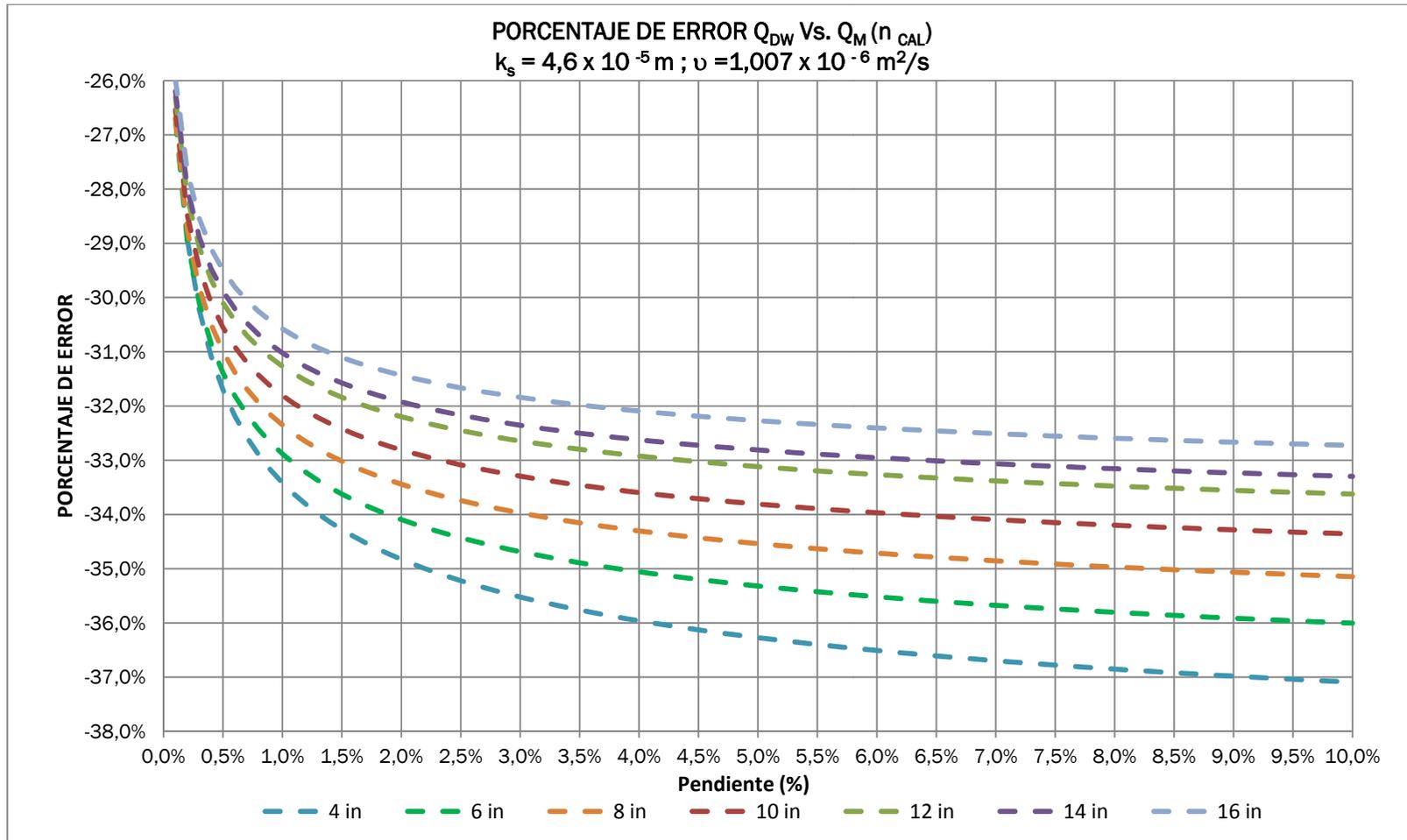


Figura 58. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ cuando $k_s = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

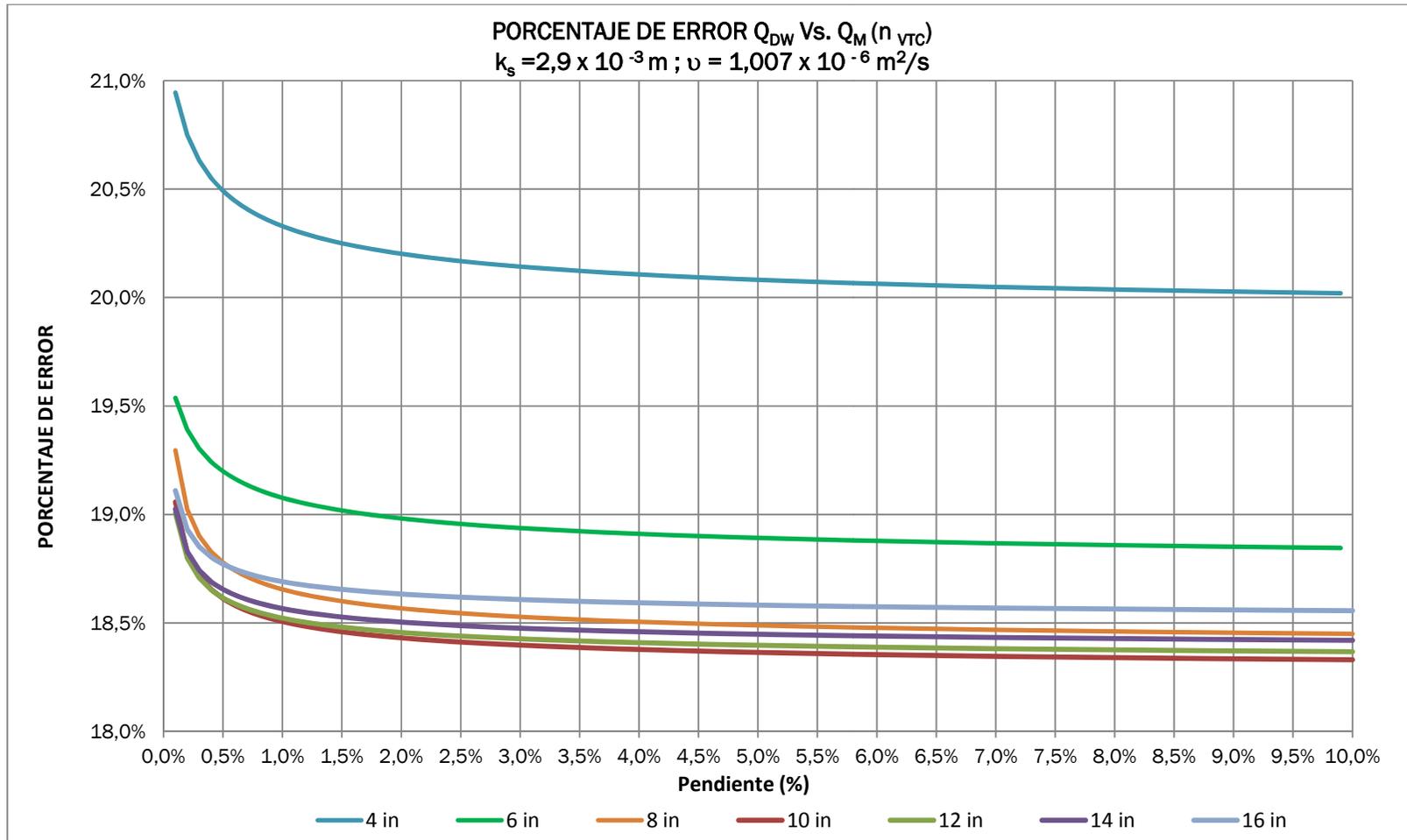


Figura 59. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{VTC})$ cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados.

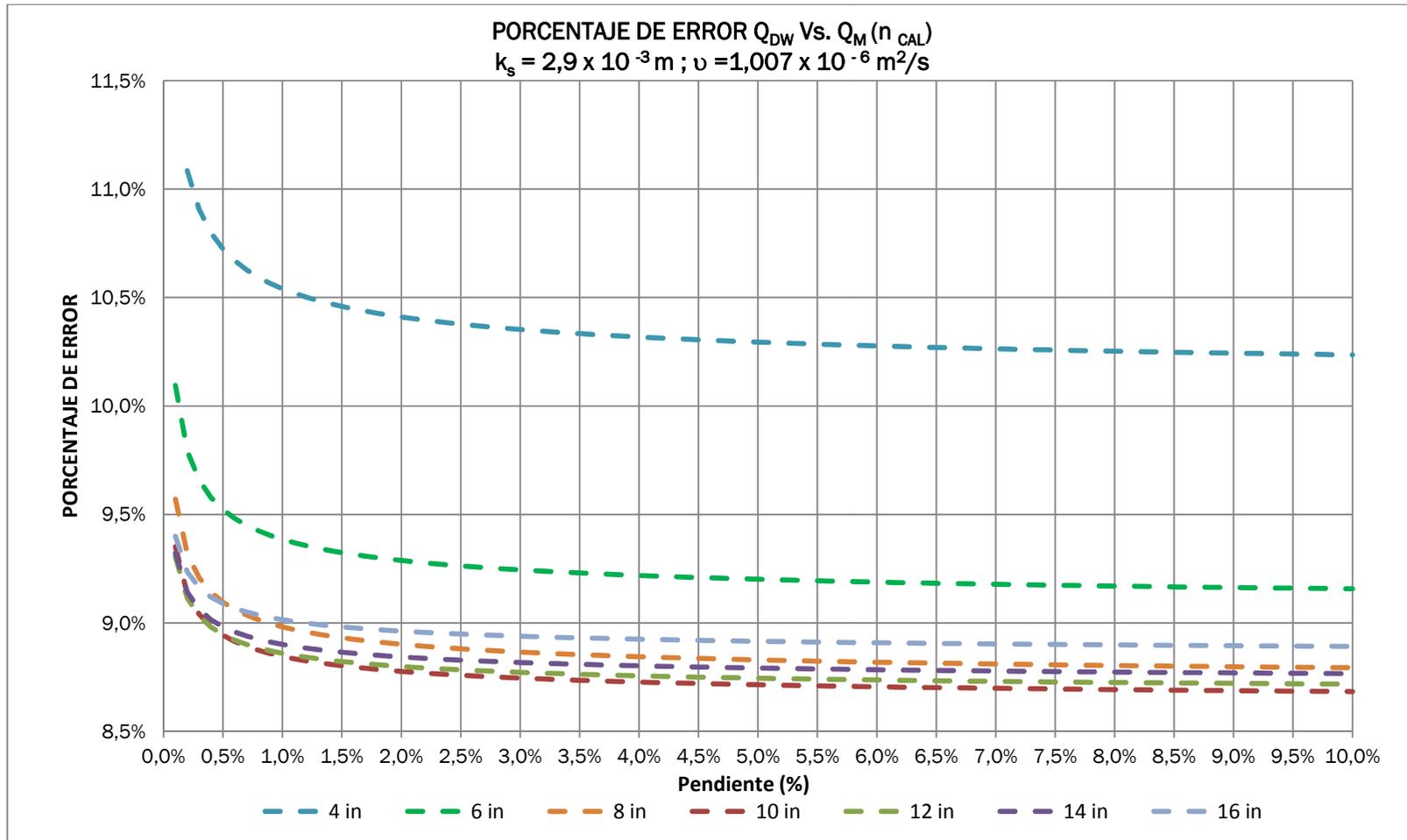


Figura 60. Porcentaje de error Q_{DW} ($\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Vs. $Q_M (n_{CAL})$ cuando $k_s = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ para todos los diámetros evaluados