

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales  
Licenciatura en Ingeniería en Materiales  
Proyecto Final de Graduación

Instituto Costarricense de Electricidad  
ICE

“DURACON”

Efecto de la acción del ambiente en la durabilidad del concreto.

Realizado por:

María Gabriela Ortiz Sancho

Profesor guía:

Ing. Juan Fernando Álvarez Castro, Dr.

Asesora Industrial:

Ing. Erika Saborío Leiva

Segundo Semestre, 2007

## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Efecto de la acción del ambiente en la durabilidad del concreto” y realizado en “el Instituto Costarricense de Electricidad, I.C.E.”, durante el II semestre del 2007, ha sido defendido ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Ing. Galina Pridybailo Chekan e Ing. Óscar Chaverri Quirós; como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La orientación y supervisión del proyecto desarrollado por el estudiante, estuvo a cargo del profesor asesor Ing. Juan Fernando Álvarez Castro, Dr.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

\_\_\_\_\_  
Ing. Galina Pridybailo Chekan  
Profesora Evaluadora

\_\_\_\_\_  
Ing. Óscar Chaverri Quirós, MSc.  
Profesor Evaluador

\_\_\_\_\_  
Ing. Juan Fernando Álvarez C, Dr.  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_  
Sra. María Gabriela Ortiz Sancho  
Estudiante

Cartago, 27 de noviembre de 2007

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco, primero a mi Señor Jesús Cristo, a mi familia, a mi esposo y a todas las personas que me han ayudado en la realización de mi Proyecto Final de Graduación.

Al personal del Centro de Investigación en Corrosión, CICorr, en especial a la Ingeniera Erika Saborío Leiva, por la oportunidad brindada y al Ingeniero Juan Fernando Álvarez Castro, Dr., profesor guía.

Mi profundo agradecimiento a todos ellos.

## DEDICATORIA

*A mis padres por todo su apoyo y la infinita paciencia que me tuvieron durante  
estos años de formación académica.*

## INDICE GENERAL

Página

<b>CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE GENERAL .....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XII</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>A. El Instituto Costarricense de Electricidad, I.C.E. ....</b>	<b>1</b>
<b>B. Objetivos del Instituto Costarricense de Electricidad.....</b>	<b>2</b>
1. <i>Misión Sector Electricidad</i> .....	2
2. <i>Visión Sector Electricidad</i> .....	2
<b>C. Organización del I.C.E. ....</b>	<b>3</b>
<b>D. Centro de Investigación en Corrosión (CICorr) .....</b>	<b>3</b>
1. <i>Líneas de investigación</i> : .....	4
2. <i>Servicios</i> : .....	5
3. <i>Objetivo general del CICorr</i> : .....	5
4. <i>Historial</i> : .....	6
<b>E. Justificación del proyecto .....</b>	<b>6</b>
<b>F. Objetivos del proyecto.....</b>	<b>7</b>
1. <i>Objetivos Generales</i> : .....	7
2. <i>Objetivos Específicos</i> : .....	7
<b>G. Alcance y limitaciones .....</b>	<b>7</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
<b>A Corrosión en concreto.....</b>	<b>9</b>
1. <b>Generalidades de corrosión.....</b>	<b>9</b>
2 <b>Corrosión de la armadura en el concreto .....</b>	<b>10</b>

<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>20</b>
<b>A. DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>B. DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE CONCENTRACIÓN DE CLORUROS</b> ...	<b>20</b>
<b>C. CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL REFUERZO</b> .....	<b>21</b>
1. Potencial de corrosión.....	22
2. Velocidad instantánea de corrosión del refuerzo.....	22
<b>D. CARACTERIZACIÓN DE LA AGRESIVIDAD AMBIENTAL</b> .....	<b>24</b>
1. Determinación de cloruros.....	24
2. Determinación de sulfatos .....	25
3. Determinación de CO <sub>2</sub> .....	25
<b>E. RESISTIVIDADES</b> .....	<b>26</b>
<b>F. EVALUACIÓN Y COMPENSACIÓN DE LA CAÍDA ÓHMICA</b> .....	<b>27</b>
<b>IV. RESULTADOS</b> .....	<b>28</b>
<b>A. CARACTERIZACIÓN DE LA(S) ATMÓSFERA(S)</b> .....	<b>28</b>
1. Estación Poás- Volcánica .....	28
2. Estación Pavas- Urbano/Industrial .....	32
3. Estación San José- Urbana.....	35
4. Estación Moín- Marina .....	38
<b>B. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS</b> .....	<b>42</b>
<b>C. EVALUACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL CONCRETO</b> .....	<b>44</b>
1. Penetración de cloruros.....	44
2. Resistividad y penetración de la carbonatación, $e_{CO_2}$ .....	48
<b>D. MEDIDAS ELECTROQUÍMICAS</b> .....	<b>50</b>

1. Equipos de medida.....	50
2. Resultados de las medidas electroquímicas .....	51
<b>E. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS.....</b>	<b>99</b>
1. Medidas de resistividad .....	99
2. Penetración de cloruros.....	101
<b>V. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>103</b>
<b>A. CARACTERIZACIÓN DE LA(S) ATMÓSFERA(S).....</b>	<b>103</b>
<b>B. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS .....</b>	<b>103</b>
<b>C. EVALUACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL CONCRETO.....</b>	<b>104</b>
1. Penetración de cloruros.....	104
2. Resistividad y penetración de la carbonatación, $e_{CO_2}$ .....	105
<b>D. MEDIDAS ELECTROQUÍMICAS .....</b>	<b>105</b>
1. Resultados de las medidas electroquímicas .....	105
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>108</b>
<b>VIII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>109</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura N° 1. Elementos constituyentes de la celda de corrosión.....	10
Figura N° 2. Esquema de la prueba de resistencia a la polarización.....	12
Figura N° 3. Curva de polarización del acero en concreto en probeta DURACON.....	12
Figura N° 4. Descripción esquemática de las medidas de potencial.....	13
Figura N° 5. Efecto de la caída óhmica en la forma de las curvas de polarización.....	15
Figura N° 6. Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación.....	16
Figura N° 7. Perfil de concentración de cloruros en el hormigón.....	18
Figura N° 8. a) Probeta de Pavas con 5mm de carbonatación, b) Probeta de San José con 0mm de carbonatación.....	20
Figura N° 9. Molienda de muestras para pruebas de concentración de cloruros. ...	21
Figura N° 10. Potenciostato-galvanostato marca Gill, modelo 08 AC.....	23
Figura N° 11. Estación de monitoreo ambiental. (a) Estación completa, (b) detalle de la vela húmeda para determinar cloruros, y (c) detalle de la vela de plomo para determinar sulfatos.....	24
Figura N° 12. Equipo usado en las mediciones de concentración de CO <sub>2</sub> en el ambiente.....	25
Figura N° 13. a) Resistómetro empleado para hacer las pruebas de resistividad eléctrica y b) Sistema armado: bolsa plástica, placa de acero inoxidable, esponja, probeta de medición, esponja, placa de acero inoxidable, bolsa plástica y contrapeso.....	26
Figura N° 14. Esquema de medición de la caída óhmica.....	27
Figura N° 15. Estación Poás. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.....	28
Figura N° 16. Estación Poás. Evolución de la Temperatura (T/°C), durante el tiempo de exposición.....	29
Figura N° 17. Estación Poás. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	29
Figura N° 18. Estación Poás. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera (Cl <sup>-</sup> /mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	30
Figura N° 19. Estación Poás. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera (SO <sub>2</sub> /mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	30
Figura N° 20. Estación Poás. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera (CO <sub>2</sub> /mg.L <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	31
Figura N° 21. Estación Pavas. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.....	32
Figura N° 22. Estación Pavas. Evolución de la Temperatura (T/°C), durante el tiempo de exposición.....	32
Figura N° 23. Estación Pavas. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	33
Figura N° 24. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera (Cl <sup>-</sup> /mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	33
Figura N° 25. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera (SO <sub>2</sub> /mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	34



Figura N° 26. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera ( $\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	34
Figura N° 27. Estación San José. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.....	35
Figura N° 28. Estación San José. Evolución de la Temperatura ( $T/^\circ\text{C}$ ), durante el tiempo de exposición.....	35
Figura N° 29. Estación San José. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	36
Figura N° 30. Estación San José. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera ( $\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	36
Figura N° 31. Estación San José. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera ( $\text{SO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	37
Figura N° 32. Estación San José. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera ( $\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	37
Figura N° 33. Estación Moín. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.....	38
Figura N° 34. Estación Moín. Evolución de la Temperatura ( $T/^\circ\text{C}$ ), durante el tiempo de exposición.....	38
Figura N° 35. Estación Moín. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año <sup>-1</sup> ), durante el tiempo de exposición.....	39
Figura N° 36. Estación Moín. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera ( $\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	39
Figura N° 37. Estación Moín. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera ( $\text{SO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	40
Figura N° 38. Estación Moín. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera ( $\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.....	40
Figura N° 39. Estación Póas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de $a/c = 0,45$ , tanto en cara expuesta como en cara resguardada.....	44
Figura N° 40. Estación Póas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de $a/c = 0,65$ , tanto en cara expuesta como en cara resguardada.....	45
Figura N° 41. Estación Pavas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de $a/c = 0,45$ , tanto en cara expuesta como en cara resguardada.....	46
Figura N° 42. Estación Pavas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de $a/c = 0,65$ , tanto en cara expuesta como en cara resguardada.....	47
Figura N° 43. Estación Póas. Mezcla $a/c = 0,45$ . Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	51
Figura N° 44. Estación Póas. Mezcla $a/c = 0,45$ . Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	52
Figura N° 45. Estación Póas. Mezcla $a/c = 0,45$ . Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	53

Figura N° 46. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	54
Figura N° 47. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	55
Figura N° 48. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	56
Figura N° 49. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	57
Figura N° 50. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	58
Figura N° 51. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	59
Figura N° 52. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	60
Figura N° 53. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	61
Figura N° 54. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	62
Figura N° 55. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	63
Figura N° 56. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	64
Figura N° 57. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	65
Figura N° 58. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	66
Figura N° 59. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	67
Figura N° 60. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	68

Figura N° 61. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	69
Figura N° 62. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	70
Figura N° 63. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	71
Figura N° 64. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	72
Figura N° 65. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	73
Figura N° 66. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	74
Figura N° 67. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	75
Figura N° 68. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	76
Figura N° 69. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	77
Figura N° 70. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	78
Figura N° 71. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	79
Figura N° 72. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	80
Figura N° 73. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	81
Figura N° 74. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	82
Figura N° 75. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	83

Figura N° 76. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	84
Figura N° 77. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	85
Figura N° 78. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	86
Figura N° 79. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	87
Figura N° 80. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	88
Figura N° 81. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	89
Figura N° 82. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	90
Figura N° 83. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	91
Figura N° 84. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	92
Figura N° 85. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	93
Figura N° 86. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	94
Figura N° 87. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	95
Figura N° 88. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).....	96
Figura N° 89. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).....	97
Figura N° 90. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).....	98

## **RESUMEN**

*Ortiz Sancho, María Gabriela. Noviembre, 2007. DURACON. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor Asesor: Juan Fernando Álvarez Castro, Dr.*

El proyecto DURACON es un proyecto Iberoamericano, en el que está participando el ICE representando nuestro país.

Se realizó para contar con parámetros que permitan la elaboración de estructuras de concreto reforzado que cumplan con los requerimientos de nuestro territorio, tomando en cuenta las diferentes zonas del mismo, su clima y los contaminantes presentes en cada una de las zonas que se evaluaron.

Para efectos de este Proyecto Final de Graduación se contó con los datos recolectados durante el periodo comprendido entre julio y noviembre del año 2007.

Se corroboró que, en general, las condiciones ambientales en nuestro país pueden propiciar los procesos de corrosión. Además se evidenció que de la composición del concreto depende la resistencia al ataque corrosivo, así como las propiedades del mismo.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. El Instituto Costarricense de Electricidad, I.C.E.

En 1948 un grupo de ingenieros encabezados por Jorge Manuel Dengo Obregón, presenta a la Junta Directiva del Banco Nacional un documento titulado "*Plan General de Electrificación de Costa Rica*". El Banco Nacional lo remite al Gobierno de la República para que lo analizara y el resultado fue la creación del **Instituto Costarricense de Electricidad ICE**.

El Instituto Costarricense de Electricidad (I.C.E.) se creó el 8 de Abril de 1949 por Decreto de Ley N°449, con el fin de buscar solución a la crisis eléctrica del país. Se creó como Institución Autónoma y su programa básico de trabajo consistió en la construcción y puesta en servicio de nuevas plantas generadoras y sus correspondientes redes de distribución, líneas de transmisión y subestaciones.

Su finalidad es desarrollar racionalmente las fuentes productoras de energía propias de Costa Rica, especialmente los amplios recursos hidráulicos y estimular el uso de la electricidad para el desarrollo industrial y mejora de la calidad de vida de los habitantes. Además, al promulgarse la ley N°3226 del 28 de Octubre de 1963, al Instituto se le encomendó el establecimiento, mejoramiento, funcionamiento y ampliación de los servicios de comunicaciones telefónicas y telegráficas tanto nacionales como internacionales.

## **B. Objetivos del Instituto Costarricense de Electricidad**

Por imperativo de su Ley Orgánica, los objetivos del ICE son mantener en funcionamiento correcto los servicios eléctricos de las redes propias y de telecomunicaciones de todo el país. Por lo tanto, debe de planificar, diseñar, construir, poner en servicio, ampliar y dar mantenimiento a las plantas generadoras, subestaciones, líneas de transmisión y redes de distribución del sector eléctrico, lo mismo que las centrales, planta externa y demás elementos del sistema de telecomunicaciones.

### ***1. Misión Sector Electricidad***

"Mejorar la calidad de vida y el desarrollo económico y social, a través de un servicio de electricidad que supera las expectativas de bienestar, comodidad y progreso de todos los costarricenses." I.C.E.

### ***2. Visión Sector Electricidad***

"Constituirse en la mejor empresa eléctrica de América con respecto a la calidad, continuidad, solidaridad, universalidad y precio competitivo del servicio, a la satisfacción de los clientes, al desarrollo sostenible de los recursos energéticos renovables y al manejo del medio ambiente; y ser reconocida como un factor fundamental para el desarrollo económico y social del país, como un símbolo de la capacidad y la democracia costarricense y como un líder de la integración eléctrica de América Central." I.C.E.

El ICE al ser una Institución pública por ley brinda sus servicios al costo, sin fines de lucro, además no da ayuda a otras instituciones directamente para evitar el alza en los costos de operación.

El ICE posee personal altamente calificado, desde técnicos con mucha capacitación hasta profesionales especializados en diferentes áreas.

### **C. Organización del I.C.E.**

Funcionalmente el ICE esta organizado de la siguiente manera:

Junta Directiva: llamada también Consejo Directivo. Constituye la máxima autoridad dentro de la institución. Estos miembros son nombrados por el Consejo de Gobierno de la República, el que define la política que debe observar la institución. La Junta cuenta con la Secretaría y con la Asistencia Técnica y Administrativa. Relacionada directamente con la Junta Directiva pero manteniendo su autonomía operacional se encuentra la Auditoria.

La Junta Directiva nombra al gerente, a los subgerentes, al auditor, al subauditor y al tesorero.

Las líneas que maneja la empresa son las siguientes:

- Servicio eléctrico
- Telecomunicaciones

### **D. Centro de Investigación en Corrosión (CICorr)**

“Con base en diversos estudios realizados, se estima que en un país como el nuestro las pérdidas causadas por la corrosión son en promedio entre un 1.25% y un 3.5% del Producto Nacional Bruto. Mediante la implementación de sistemas adecuados para la prevención de la corrosión, estas pérdidas pueden reducirse hasta un 20%.

Una solución del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) a este problema fue constituir el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr), único en el país que cuenta con el equipo humano y técnico para la investigación de todas las áreas en el campo de la corrosión y, lo que es más importante, con la capacidad de brindar servicios integrales.



Esta dependencia del Centro de Servicio, Investigación y Desarrollo en Energía, de la Unidad Estratégica de Negocios, Proyectos y Servicios Asociados (UEN-PYSA) abrió sus puertas en agosto de 1996. La inversión en equipos, permite actualmente ofrecer diversos servicios, desde sus instalaciones ubicadas en el Plantel de Colima de Tibás, San José. Entre otras, el Centro de Investigación puede proveer soluciones prácticas contra la corrosión, así como ofrecer servicios de análisis y medición a distintas dependencias del ICE u otras entidades externas de las institución” Saborío y Rojas (8)

El CICorr cuenta con un personal interdisciplinario, conformado por un coordinador, cinco profesionales, un técnico y una secretaria. Eventualmente se dispone de asistentes y practicantes profesionales, quienes colaboran en el desarrollo de proyectos. Cada profesional se ha encargado de desarrollar áreas de la corrosión específicas: Protección Catódica, Electroquímica, Corrosión Atmosférica, Recubrimientos y Corrosión en Concretos.

### ***1. Líneas de investigación:***

- Corrosión Atmosférica
- Corrosión de Estructuras de Concreto
- Corrosión Microbiológica
- Protección Catódica
- Recubrimientos anticorrosivos
- Monitoreo de la corrosión en línea

## **2. Servicios:**

- Control de calidad de galvanizado
- Evaluación metalográfica
- Determinación de porcentaje de sólidos en pinturas
- Evaluación de adherencia de recubrimientos
- Medición de espesores de película
- Ensayos de intemperismo acelerado
- Ensayos electroquímicos
- Ensayos de dureza
- Evaluación de resistividad de suelos
- Diseños de protección catódica
- Puesta en marcha de sistemas de protección catódica
- Verificación de sistemas de protección catódica
- Control de especificaciones técnicas
- Ensayos de resistividad en concretos
- Ensayos de penetración de cloruros en concretos
- Ensayos de profundidad de carbonatación en concretos
- Evaluación de homogeneidad de concretos
- Evaluación de durabilidad en concretos
- Diagnóstico del estado de corrosión en estructuras
- Medición de espesores de pared por ultrasonido
- Cursos de capacitación y actualización

## **3. Objetivo general del CICorr:**

- Desarrollar y fomentar un área de corrosión en la Institución que permita brindar soluciones en este campo, partiendo de un recurso humano interdisciplinario y con basta experiencia en el campo de la corrosión

#### **4. Historial:**

1992 Programa de Corrosión, DGCT

1997 Laboratorio de Corrosión, CS I+D

1999 Centro de Investigación en Corrosión, CICorr, CS I+D

#### **E. Justificación del proyecto**

En Costa Rica no existen estudios que permitan evaluar la durabilidad del concreto, y desarrollar así normas y procedimientos para el diseño de estructuras de concreto con base en durabilidad.

El proyecto DURACON permite evaluar la durabilidad del concreto en estaciones de ensayo natural, a través de una serie de pruebas, para determinar el desempeño del mismo ante distintos ambientes: marino, rural, urbano y volcánico.

Este es un proyecto iberoamericano, que se está desarrollando al mismo tiempo en Venezuela, Colombia, México, Uruguay, Portugal, Brasil, España, Bolivia, Chile, Argentina y Costa Rica.

A través del proyecto final de graduación se realizarán las pruebas, ensayos y análisis de resultados del proyecto DURACON, durante el periodo establecido por el ITCR como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería en Materiales con énfasis en Metalurgia.

## **F. Objetivos del proyecto**

### **1. Objetivos Generales:**

1. Evaluar la influencia del medio ambiente sobre la durabilidad del concreto, a través del desarrollo del proyecto DURACON, durante el período del proyecto final de graduación el cual inicia el 23 de julio y finaliza el 9 de noviembre del año 2007.
2. Colaborar en el desarrollo e implementación del plan metrológico del Centro Investigación en Corrosión, desarrollando procedimientos relacionados con pruebas del proyecto DURACON.

### **2. Objetivos Específicos:**

1. Estudiar el fenómeno de corrosión en concretos, normas y ensayos relacionados con el proyecto DURACON, durante el periodo del proyecto final de graduación.
2. Elaborar procedimientos para ensayo de resistividad y penetración de cloruros, necesarios para el proyecto DURACON.
3. Elaborar el procedimiento de uso, mantenimiento y calibración del equipo para medición de dióxido de carbono. Este documento es de uso confidencial del ICE, por lo cual no se incluye en este documento.

## **G. Alcance y limitaciones**

Durante la realización del proyecto final de graduación, se cumplirá con los objetivos generales y específicos planteados en esta tesis para el desarrollo del proyecto “Influencia de la acción del medio ambiente sobre la durabilidad del concreto, DURACON”.

El proyecto DURACON tiene una duración de 4 años, actualmente lleva 2 años y para el caso del proyecto final de graduación se tomaran los datos recolectados durante el periodo establecido por el ITCR para el mismo.

## II. MARCO TEÓRICO

### A Corrosión en concreto.

#### 1. Generalidades de corrosión

La corrosión es la degradación de los materiales, en este caso, los materiales metálicos, causando muchos problemas directa e indirectamente. Se lleva a cabo a través de un proceso químico o electroquímico.

En la naturaleza los metales, excluyendo los metales nobles, se hallan combinados con otros elementos químicos formando minerales, los podemos encontrar en forma de óxidos, sulfuros y carbonatos entre otros.

Para poder obtener el metal puro se deben utilizar grandes cantidades de energía en su separación de los minerales.

De esta forma comienza el proceso de oxidación, pues la energía requerida para su separación los vuelve muy inestables por lo que ellos buscarán volver a un estado menos energético, su estado natural. La corrosión metálica es una reacción de oxidación-reducción.

#### 1.1 Proceso electroquímico.

El proceso de corrosión electroquímica involucra una reacción química además de corriente eléctrica. Debe tener presente los siguientes elementos:

- Un ánodo, parte negativa donde ocurre la reacción de oxidación o corrosión.
- Un cátodo, parte positiva donde ocurre la reacción de reducción.
- Un electrolito, sustancia que permite la formación de iones.
- Un conductor externo entre el ánodo y el cátodo que permite el flujo de los electrones (corriente eléctrica).

## 2 Corrosión de la armadura en el concreto

El concreto es un material que se obtiene de la mezcla de cemento, arena, pedazos de piedra y agua, esta debe hacerse manteniendo una proporción determinada de cada uno de sus componentes. Cuando se une con acero, el acero resiste los esfuerzos de tracción y el concreto los de compresión, a esta unión se le conoce como concreto reforzado.

El concreto le brinda al acero protección por ser una barrera física que lo resguarda del medio ambiente, además el líquido encerrado en los poros del concreto, es un electrolito que le permite al acero formar un óxido protector preservándolo de forma duradera, esta capa de óxidos es muy adherente, compacta e invisible.

Este líquido compuesto, en su mayoría, por iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), le otorga una alta alcalinidad al concreto con un pH de 13 a 14, que permite que se forme una fina y muy adherente capa de óxidos en la armadura, que pasiva el metal y por tanto lo protege. En estructuras sumergidas, donde no hay presencia de oxígeno, el refuerzo de acero se oxidaría muy lentamente sin causar problemas de corrosión.

Cuando se presenta corrosión en la armadura del concreto, se da una oxidación destructiva del acero, como resultado de la formación de una celda electroquímica como la de la figura N° 1 en la que el concreto va a ser el electrolito.

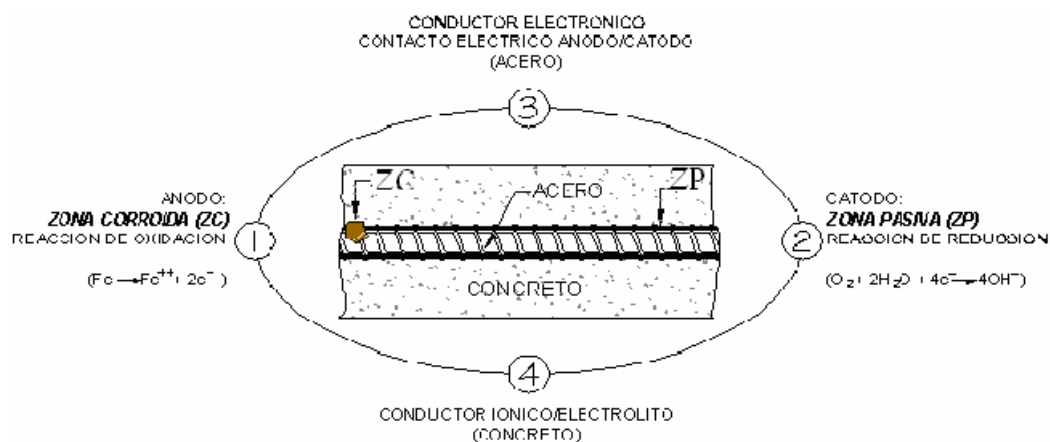


Figura N° 1. Elementos constituyentes de la celda de corrosión

Esta celda se forma por la heterogeneidad del acero, el contacto con metales menos activos, además de la falta de uniformidad del concreto; esto sucede cuando las condiciones de trabajo cambian, la composición del concreto se altera o a través de él penetran sustancias perjudiciales, provocando el rompimiento de la capa pasivante. Todo esto hace que el acero disminuya su sección o desaparezca por completo, además el concreto puede fisurarse o delaminarse, por último, la adherencia acero - concreto disminuye o desaparece.

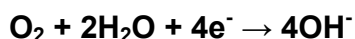
Existen dos mecanismos para que se de la corrosión del acero:

1. Disminución del pH por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido y
2. por la acción electroquímica que involucra el ión cloruro en presencia de oxígeno.

La corrosión del acero involucra una reacción anódica:



Además de una reacción catódica:



Estas reacciones deben ser simultáneas y se dan en presencia de agua.

## **2.1 Ensayos realizados:**

### **Resistencia de polarización (RPL).**

Esta técnica es utilizada para estimar el grado de corrosión del acero en el concreto o mortero. En el potencial de corrosión,  $E_{\text{corr}}$ , las corrientes anódicas y catódicas son iguales en magnitud, entonces la aplicación de una corriente externa hace que el potencial se desplace del  $E_{\text{corr}}$ . Esto se conoce como polarización. Para realizar esto se utiliza un potencióstato, que desplaza algunos milivoltios (mV), al acero del equilibrio, la corriente entre el acero y el electrodo auxiliar se mide a través de un electrodo de referencia, tal y como se muestra en la figura N° 2.



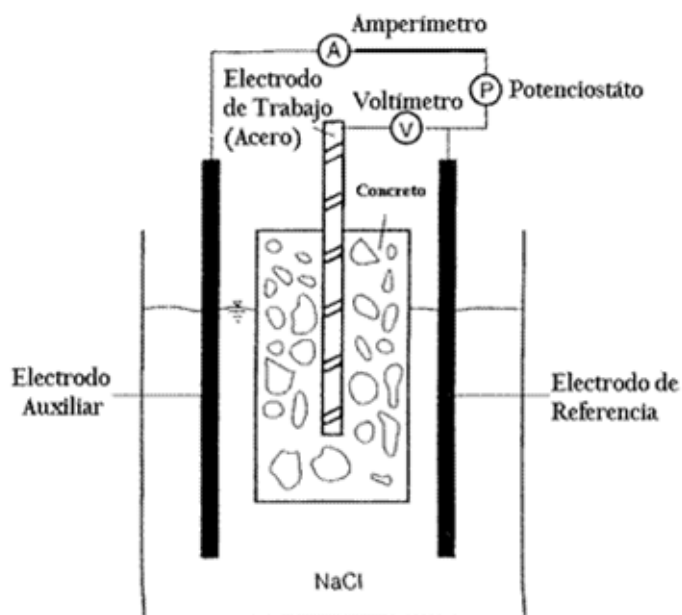


Figura N° 2. Esquema de la prueba de resistencia a la polarización

En la práctica el potencial inicial se fija 20mV debajo del  $E_{\text{corr}}$ , luego se hace un barrido alrededor de 0,1mV/s. Se registra la respuesta de la corriente durante esta exploración, esto se representa en la figura N° 3 que muestra la relación entre la naturaleza lineal de la corriente y el voltaje.

En general, se ha encontrado que cuando  $i_{\text{corr}} > 0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , la barra se encuentra activa.

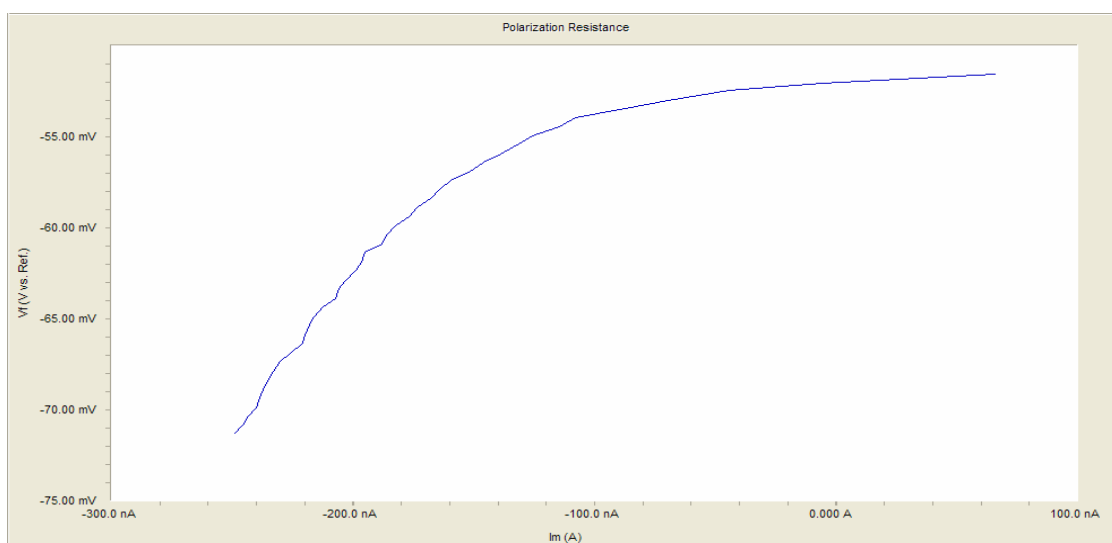


Figura N° 3. Curva de polarización del acero en concreto en probeta DURACON

Otra complicación cuando se trabaja en sistemas de concreto es que la resistencia del concreto suele ser muy alta, lo que puede conducir a resultados erróneos, tanto como un factor de 2 o más desde la densidad de corriente de corrosión,  $I_{corr}$ , verdadera, por eso es necesario medir la caída óhmica.

### Potencial de corrosión.

El potencial de corrosión representa el potencial en que los índices de los procesos anódicos y catódicos están en equilibrio bajo una condición dada. El potencial puede ser determinado midiendo la diferencia del voltaje entre un electrodo de referencia y el acero. Es necesario realizar las medidas en varios puntos.

Los electrodos de referencia deben estar en perfecto estado y ser, periódicamente, comparados con un electrodo de referencia primario. Se requiere un voltímetro con entrada de alta impedancia  $> 10M\Omega$ , capaz de leer con una resolución de 1mV y en un rango mayor a 2V. Si el acero está en concreto o mortero, entonces, la cubierta debe estar completamente húmeda hasta llegar al acero para obtener una lectura estable. El acero se conecta al extremo positivo del voltímetro y el electrodo de referencia se conecta a tierra. Un esquema de esto se observa en la figura N° 4.

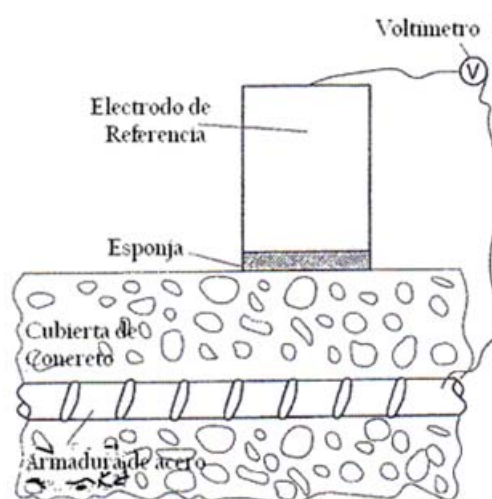


Figura N° 4. Descripción esquemática de las medidas de potencial

El Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado, del CYTED, Red Iberoamericana XV.B. DURAR, tomando en cuenta el uso de un electrodo de referencia del tipo Cu/CuSO<sub>4</sub> (cobre, sulfato de cobre), nos ofrece el criterio de evaluación mostrado en el cuadro N° 1.

Cuadro N° 1. Criterio de Valoración de Potenciales del Acero en Concreto vs Cu/CuSO<sub>4</sub>.

CONDICIÓN	POTENCIAL (V)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
Estado pasivo	+ 0,200 a - 0,200	Ausencia de Cl <sup>-</sup> pH > 12,5 H <sub>2</sub> O (HR↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	- 0,200 a - 0,600	Cl <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)	Alto
Corrosión Uniforme	-0,1 50 a - 0,600	Carbonatado O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Moderado Alto
	+ 0,200 a - 0,150	Carbonatado O <sub>2</sub> , Seco, (HR↓)	Bajo Alto
	-0,400 a - 0,600	Cl <sup>-</sup> Elevado, H <sub>2</sub> O o Carbonatado H <sub>2</sub> O, (HR↑)	
Corrosión Uniforme	< - 0,600	↑ Cl <sup>-</sup> , ↑ H <sub>2</sub> O, (sin O <sub>2</sub> )	Despreciable

Fuente: DURAR

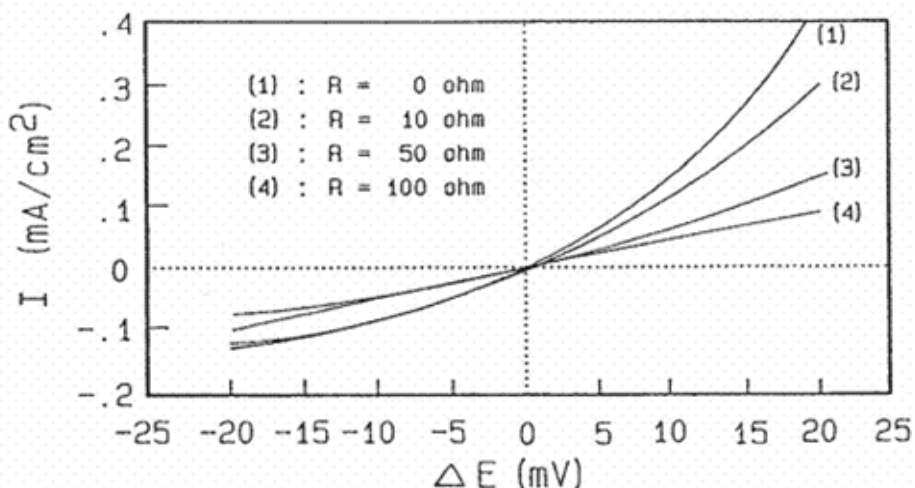
### Evaluación y compensación de la caída óhmica

Durante el flujo de corriente la diferencia de voltaje entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo auxiliar (CE) tiene dos partes: electrodo de polarización y caída óhmica a través de la solución (IR).

La medida de potencial entre WE y RE (electrodo de referencia) puede ser, sustancialmente, influenciada por el IR, particularmente si son aplicadas altas densidades de corriente o si se usa un electrolito de baja conductividad. Esto se debe a que el electrodo de referencia está conectado con un punto en la solución a cierta distancia de la doble capa electroquímica. Así una resistencia óhmica

conocida como resistencia descompensada ( $R_{IR}$ ), se incluye en la solución entre el extremo del electrodo de referencia y la superficie del electrodo de trabajo. De esta forma, un error será introducido en la medida de la diferencia de potencial de manera tal, que la diferencia de potencial entre los electrodos de referencia y de trabajo no sea tan grande en un sentido absoluto como la indicada por el potenciostato o un voltímetro auxiliar.

En estudios de la cinética de procesos del electrodo, por técnicas potencioestáticas, el potencial de la caída óhmica produce una distorsión del estado constante de la curva de polarización que, si no es corregido, producirá valores incorrectos de los parámetros característicos de las reacciones del electrodo (Figura N° 5).



Fuente: Figura 6.2 Guidelines on Electrochemical Corrosion Measurements

Figura N° 5. Efecto de la caída óhmica en la forma de las curvas de polarización.

Con los siguientes parámetros:  $b_a = 30\text{mV}$ ,  $b_c = 120\text{mV}$ ,  $i_c = 0,1\text{mA}/\text{cm}^2$ .

También las medidas de resistencia de polarización,  $R_p$ , pueden estar sujetas a errores considerables debido a la resistencia óhmica que puede conducir a una subestimación de las tasas de corrosión por varios cientos por ciento.

El efecto de descompensación de la caída  $IR$  en la determinación del grado de corrosión usando las medidas de resistencia de polarización ya fue discutido a

profundidad por muchos autores. Se mostró que en medidas electroquímicas de resistencias de polarización el valor experimental  $R_p$  es la suma del valor verdadero  $R_{p0}$  y la resistencia óhmica descompensada  $R_{IR}$  que es en esencia la resistencia del electrolito, pero puede contener la resistencia de la superficie de las películas.

Así:

$$R_p^* = R_{p0} + R_{IR} \quad 2.1$$

El error experimental relativo

$$E = (R_p^* - R_{p0})/R_{p0} = R_{IR}/R_{p0} \quad 2.2$$

### Profundidad de carbonatación.

La carbonatación es el proceso en el que el dióxido de carbono y/o el dióxido de azufre de la atmósfera, reaccionan con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto dando lugar a una neutralización de todo el material. Es importante anotar que precisamente esta alta alcalinidad del concreto es la que brinda a la barra protección contra la corrosión, y si por alguna razón esta disminuye (producto del avance del frente de carbonatación), entonces la barra puede activarse. El cambio abrupto del pH que se muestra en la figura N° 6 produce en el interior del concreto la aparición de un frente carbonatado, que se puede revelar con un indicador, tal como fenolftaleína.

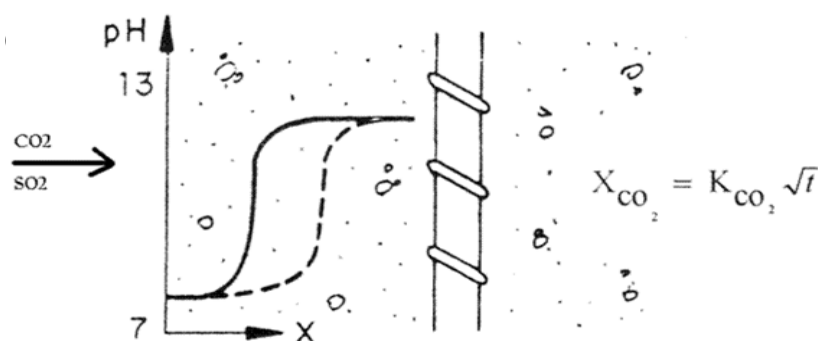


Figura N° 6. Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación

Cuando este frente alcanza la armadura, la despasiva de forma generalizada debido a la disminución del pH.

Es muy importante la velocidad de avance de este frente carbonatado, pues con esta se determina el tiempo que tardará en llegar a la armadura. La velocidad de avance es función del contenido de humedad en el concreto, la porosidad del concreto (relación agua/cemento) y su contenido de materia alcalina carbonatable.

De estos factores, el contenido de humedad es vital porque si los poros están completamente secos, el CO<sub>2</sub> o el SO<sub>2</sub> no podrán reaccionar y si están completamente saturados su penetración será lentísima debido a la baja solubilidad del CO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub> en el agua. Para que se de la carbonatación los poros deben estar parcialmente llenos (50%-80%).

El contenido de óxidos de calcio, sodio y potasio son los materiales susceptibles de carbonatarse. Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación.

Para predecir la velocidad de carbonatación del concreto reforzado se tiene la ecuación que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición: RILEM (10), UNE 112-011-94 (11)

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad 2.3$$

Donde:

$X_{CO_2}$  = profundidad de carbonatación, [mm]

$K_{CO_2}$  = constante de carbonatación, [mm \* año<sup>0,5</sup>]

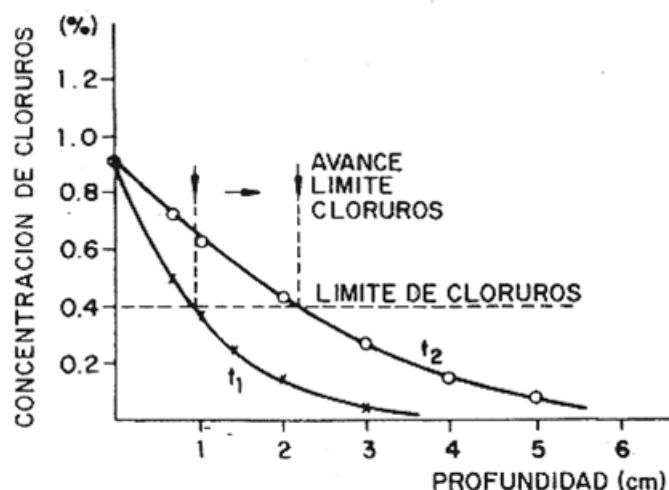
$t$  = tiempo [año]

Como criterio de evaluación de un concreto en función de su resistencia a la carbonatación, se ha determinado que valores de  $K_{CO_2}$  entre 2 y 3mm/año<sup>1/2</sup> (en función del recubrimiento); pueden ser considerados como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores de  $K_{CO_2} > 6\text{mm/año}^{1/2}$  indican concretos de muy baja resistencia a este proceso de degradación.

### Concentración de cloruros.

Los cloruros provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero.

Los cloruros pueden estar presentes en el concreto porque los contengan las materias primas o porque penetren desde el medio exterior. En el caso de los que se agregan durante el amasado, existen códigos que limitan su contenido en proporciones variables dependiendo del país, para muchos países latinoamericanos el contenido de cloruros permitidos es de 0,4% en base al contenido de cemento, DURAR (5) (Figura N° 7). Los cloruros peligrosos son los que se encuentran libres, no los que están combinados con las fases alumínicas y ferríticas de los cementos. En el caso de cloruros que penetran desde el exterior, es importante tomar en cuenta el tiempo que tardan en llegar hasta la armadura, la proporción que induce la despasivación y la velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada esta.



Fuente: Figura I.12. DURAR

Figura N° 7. Perfil de concentración de cloruros en el hormigón.

### **Resistividad eléctrica.**

La resistividad eléctrica es una propiedad que corresponde al recíproco de la conductividad de cada material se mide en ohm.cm u ohm.m. Esta propiedad depende del grado de saturación de los poros del concreto, del tipo de cemento, las adiciones inorgánicas y la relación agua/cemento (a/c), entre otras.

Este ensayo no debe realizarse sobre la armadura ya que produce errores en los resultados, además la carbonatación de la superficie del concreto también conduce a errores importantes en la medida.

### **Determinación de contaminantes atmosféricos.**

Los principales contaminantes atmosféricos son:

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ): procede tanto de la actividad volcánica como del quemado de combustibles fósiles que contienen azufre.

Los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ): provienen del agua de mar y de las emisiones volcánicas.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): se encuentra en concentraciones de 0,03% a 0,05% en volumen, y estos varían durante el día y con la estación del año.

El efecto producido por estos contaminantes sobre el concreto, ya ha sido discutido en los apartados anteriores.



### III. METODOLOGÍA

#### A. Determinación de la profundidad de carbonatación

El objetivo de esta prueba es determinar el avance de la carbonatación del concreto por el método de vía húmeda con solución de indicador ácido-base. (10), (11)

Las pruebas se realizaron utilizando fenolftaleína como indicador. Esta se aplicó uniformemente sobre la cara de corte de las probetas utilizando un atomizador, ver figura N° 8. El tiempo de aplicación del indicador no excedió 15 minutos entre el tiempo de corte y el tiempo de la aplicación. Se hizo un registro de cada muestra obteniendo un valor promedio.

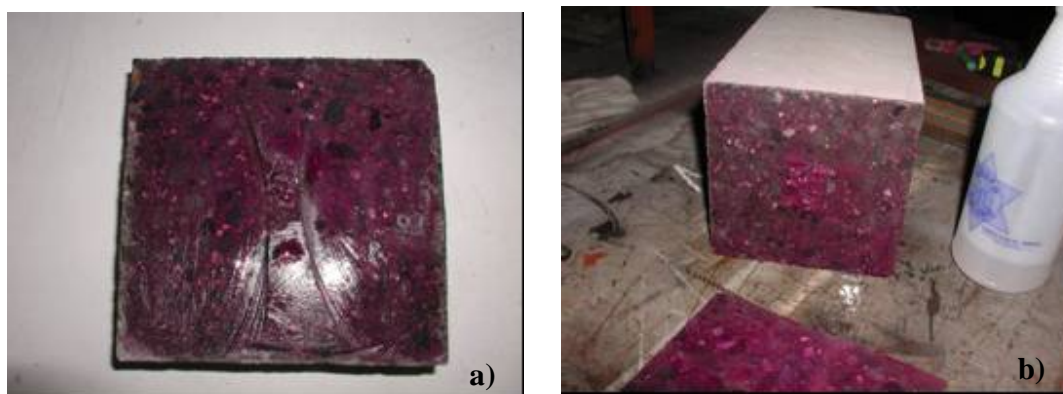


Figura N° 8. a) Probeta de Pavas con 5mm de carbonatación, b) Probeta de San José con 0mm de carbonatación

#### B. Determinación del perfil de concentración de cloruros

El objetivo de esta prueba, es determinar el perfil de concentración de los cloruros totales y solubles, presentes a diferentes niveles de profundidad en la masa de concreto. Este resultado permite calcular el coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior del concreto y con ello, la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Esta información, interrelacionada con otras

variables permite analizar el estado actual de la estructura y a su vez; estimar el tiempo que tardará este ión en alcanzar la varilla de refuerzo.

Las pruebas se efectuaron utilizando el fragmento de 5cm cortado de las probetas sin varilla, una vez realizada la prueba de carbonatación. De estos se extrajeron trozos cada 1cm, tanto en la cara expuesta como en la cara de resguardo. Los mismos fueron triturados y molidos, obteniendo de cada pieza un polvo fino, ver figura N° 9. Posteriormente, fueron enviadas al Laboratorio de Hidrología del ICE, en donde se realizaron los análisis químicos siguiendo la metodología ASTM C 1152 (11) y ASTM C 1411. (12)



Figura N° 9. Molienda de muestras para pruebas de concentración de cloruros.

### **C. Caracterización electroquímica del refuerzo**

Para determinar el estado de corrosión de las barras de refuerzo, se realizaron las siguientes pruebas:

- Potenciales de corrosión
- Velocidad de corrosión

Las mismas se hicieron en cada una de las probetas del proyecto DURACON cada dos meses.

### **1. Potencial de corrosión**

Las medidas de potencial se realizaron utilizando los siguientes equipos y herramientas:

- Brocha, cepillo, lima y otras herramientas para limpieza manual/mecánica de la superficie.
- Cables y conectores.
- Agua potable para humedecer la superficie, esponja plana.
- Electrodo de referencia (Er) de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).
- 2 Potenciostato-galvanostato: uno marca ACM Instruments modelo Gill AC 08 y otro marca Gamry de la serie G300/ZRA.

Entre los cuidados que se deben tener están: 1. Asegurar o garantizar que exista continuidad eléctrica del acero de la probeta en el momento de efectuar las mediciones, 2. Limpiar la superficie de concreto y lijar los cables conectados al acero y 3. Mojar la superficie del concreto abundantemente hasta por 30 minutos.

El electrodo de referencia se ubica siguiendo la línea central de la probeta, perpendicular a las varillas, de modo que quede sobre la varilla a la que se le está efectuando la medición. En estos puntos se coloca sobre la superficie del concreto una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-concreto. El electrodo se debe colocar sobre la esponja, efectuar y registrar la medida.

### **2. Velocidad instantánea de corrosión del refuerzo.**

Estas pruebas se realizaron utilizando un potenciostato-galvanostato, se dispone de dos en el CICorr, uno marca ACM Instruments modelo Gill AC 08 (figura N° 10) y otro marca Gamry de la serie G300/ZRA. Para determinar la velocidad instantánea de corrosión en cada una de las varillas de las probetas, se realizaron corridas de Resistencia de Polarización Lineal (RPL), la cual es aplicada mediante el confinamiento sensorizado de la señal. Las medidas se hicieron de 0 a -20 mV, a una velocidad de barrido de 3 mV/min, con un electrodo de referencia de Cu/CUSO<sub>4</sub> y una placa de acero inoxidable como electrodo auxiliar.

El procedimiento para la realización de las mediciones es el siguiente:

- Se satura con suficiente agua destilada, la superficie del concreto en donde se realizará la medición.
- Se inicia con las mediciones en una de las probetas siguiendo el procedimiento del equipo.
- Se realiza el registro de las mediciones en una bitácora y se continúa así con cada una de las probetas.

Todos los datos obtenidos se concentran en una base de datos, generándose graficas de:

- Potencial de Corrosión,  $E_{\text{corr}}$  [mV]
- Velocidad de Corrosión,  $I_{\text{corr}}$  [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]



Figura N° 10. Potenciostato-galvanostato marca Gill, modelo 08 AC.

## D. Caracterización de la agresividad ambiental

### 1. Determinación de cloruros.

Para evaluar la concentración de cloruros en el ambiente, se utilizó el método de la vela húmeda, especificado en la norma ISO 9223 (13). Para esto se colocaron estaciones de monitoreo ambiental en cada una de las estaciones de ensayo de DURACON. En la figura N° 11 se muestra una fotografía de ésta y de la vela de plomo. Las velas fueron colocadas en estas estaciones y periódicamente fueron sustituidas por nuevas velas una vez cada dos meses. Los análisis químicos fueron realizados mediante el método de ión selectivo de cloruros en el Laboratorio de Geoquímica del ICE.



Figura N° 11. Estación de monitoreo ambiental. (a) Estación completa, (b) detalle de la vela húmeda para determinar cloruros, y (c) detalle de la vela de plomo para determinar sulfatos.

## **2. Determinación de sulfatos**

Para evaluar la concentración de sulfatos en el ambiente, se utilizó el método de la vela de plomo, especificado en la norma ISO 9223. En la figura N° 11c se muestra una fotografía de la vela de plomo. Al igual que las velas húmedas, éstas fueron también sustituidas bimensualmente y analizadas mediante el método de volumetría de formación de complejos (adición de cloruro de Bario y titulación por retroceso con EDTA) en el Laboratorio Químico y de Control de Calidad Industrial, AQYLASA.

## **3. Determinación de CO<sub>2</sub>**

Para evaluar la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente, se efectuaron mediciones con un equipo portátil marca VAISALA, modelo Measurement Indicator M170, Las mediciones se efectuaron cada 2 meses. Este equipo proporciona directamente los valores de CO<sub>2</sub> en ppm. La figura N° 12 muestra el equipo utilizado.



Figura N° 12. Equipo usado en las mediciones de concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente.

## E. Resistividades

Para realizar las medidas de resistividades se fabricaron probetas cúbicas de 5x5x5 cm y se colocaron en un recipiente plástico con tapa, se colocó una rejilla en el fondo y agua destilada hasta la mitad de la rejilla. Se rociaron las muestras con agua destilada tres veces al día, hasta lograr la saturación de las probetas (aproximadamente 1 semana). Cuando el agua saturó las probetas se iniciaron las mediciones, las cuales se realizaron durante los días necesarios para obtener poca variación entre las medidas, previamente se dimensionaron las probetas.

Se utilizó un resistómetro, marca Megger. Las mediciones se realizaron conectando una de las salidas del equipo de corriente con una de voltaje a cada uno de los contraelectrodos de acero inoxidable empleados (dos en total). Se empleó una bolsa plástica para crear un aislamiento eléctrico entre la probeta y la mesa de trabajo de concreto. Ver figura N° 13.

Sobre la bolsa se armó el sistema colocando primero una de las placas de acero inoxidable conectada al equipo, luego, una esponja humedecida con agua destilada, la probeta, otra esponja y la otra placa de acero inoxidable conectada al equipo, además otra bolsa plástica para aislar el sistema del contrapeso utilizado. Los datos fueron tomados y reportados en tablas para su análisis posterior.



Figura N° 13. a) Resistómetro empleado para hacer las pruebas de resistividad eléctrica y b) Sistema armado: bolsa plástica, placa de acero inoxidable, esponja, probeta de medición, esponja, placa de acero inoxidable, bolsa plástica y contrapeso.

## F. Evaluación y compensación de la caída óhmica

El efecto de descompensación de la caída IR en la determinación del grado de corrosión usando las medidas de resistencia de polarización fue determinado utilizando un resistómetro, marca Megger. Las medidas se realizaron en cada una de las varillas de las probetas de DURACON inmediatamente después de realizadas las mediciones de RPL.

En la figura N° 14 se muestra un esquema de las conexiones de la probeta al resistómetro. La prueba se realiza conectando un electrodo de referencia (RE) a una de las salidas de voltaje del resistómetro, un electrodo de trabajo (WE), en este caso la varilla a medir la IR que se conecta a una salida de corriente y voltaje del resistómetro, y un contraelectrodo (CE), en este caso se emplea una placa de acero inoxidable, que se conecta a una de las salidas de corriente del equipo. Entre el contraelectrodo y el electrodo de referencia se coloca una esponja húmeda para lograr un mejor contacto eléctrico con la superficie de la probeta de concreto. Esto mismo se va haciendo con cada una de las varillas de cada probeta.

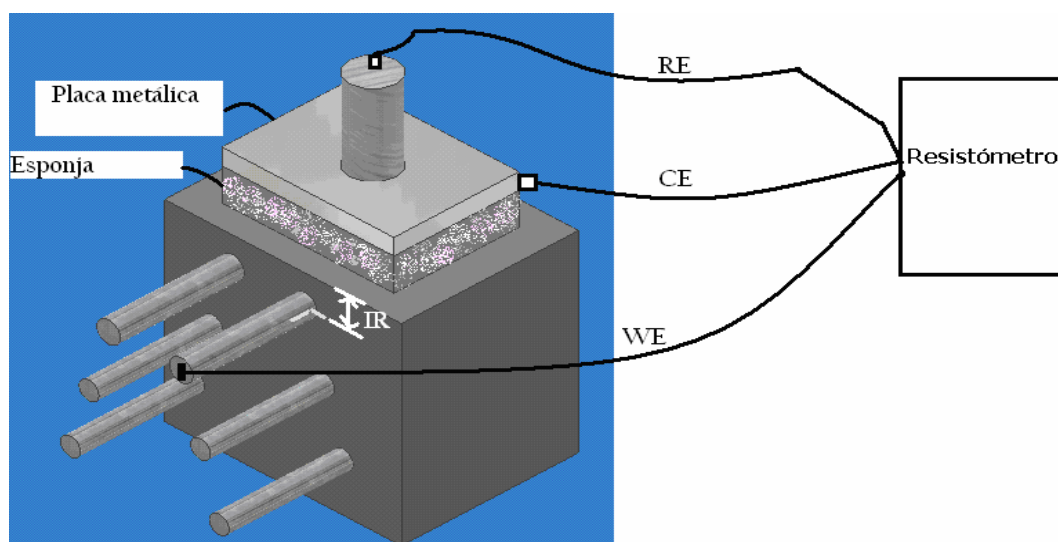


Figura N° 14: Esquema de medición de la caída óhmica



## IV. RESULTADOS

### A. Caracterización de la(s) atmósfera(s)

A continuación se presentan los parámetros proporcionados a la fecha por el Instituto Meteorológico Nacional para este año.

#### 1. Estación Poás- Volcánica

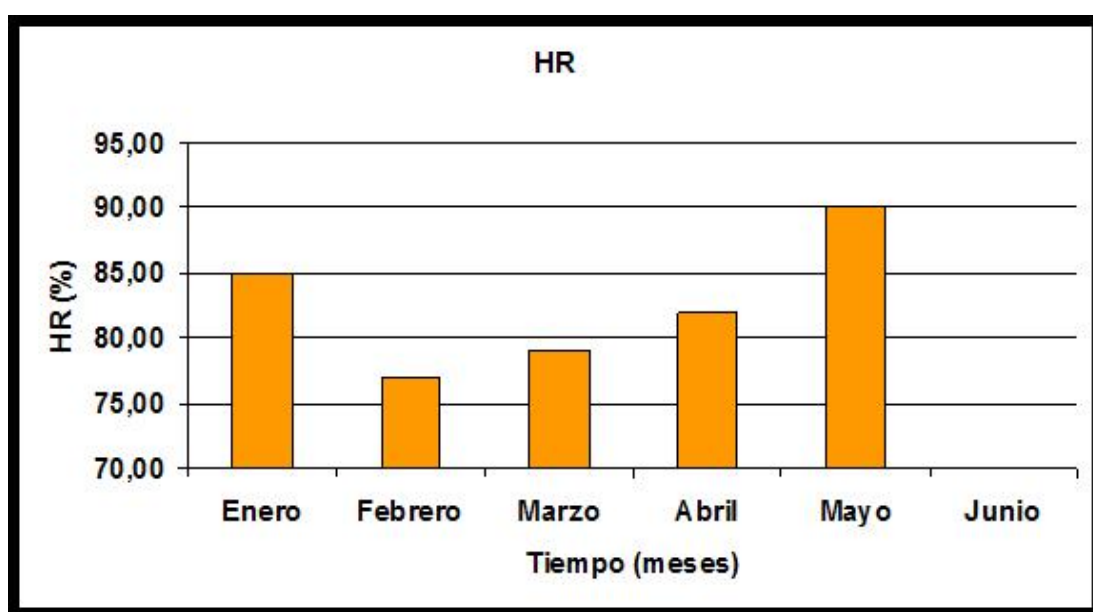


Figura N° 15. Estación Poás. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición

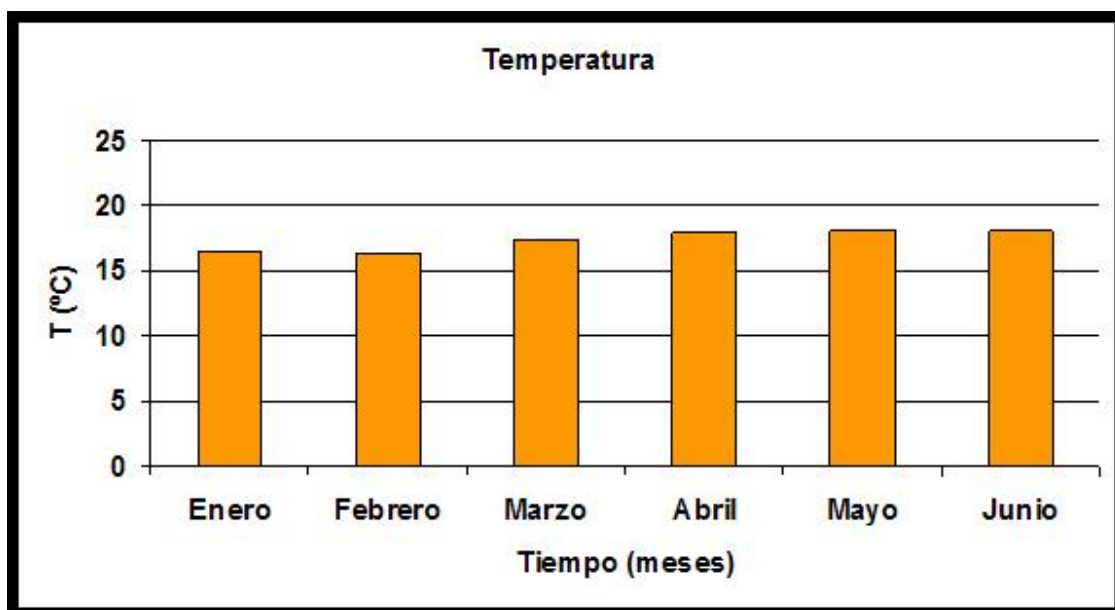


Figura N° 16. Estación Poás. Evolución de la Temperatura ( $T/^{\circ}\text{C}$ ), durante el tiempo de exposición

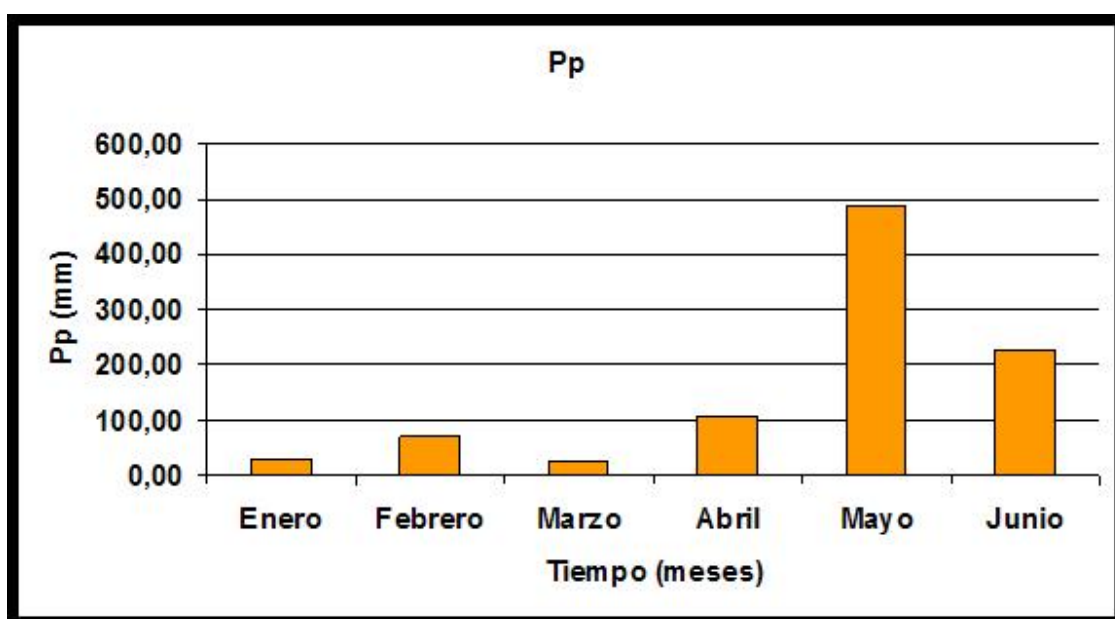


Figura N° 17. Estación Poás. Evolución de la Precipitación ( $\text{Prec./mm.año}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

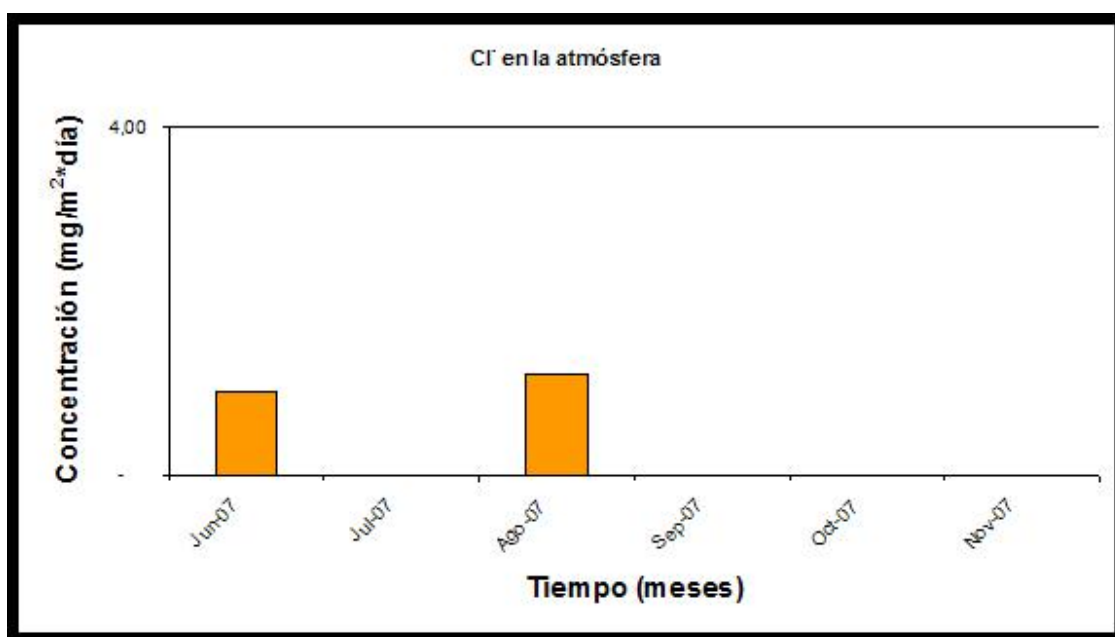


Figura N° 18. Estación Poás. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera ( $\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

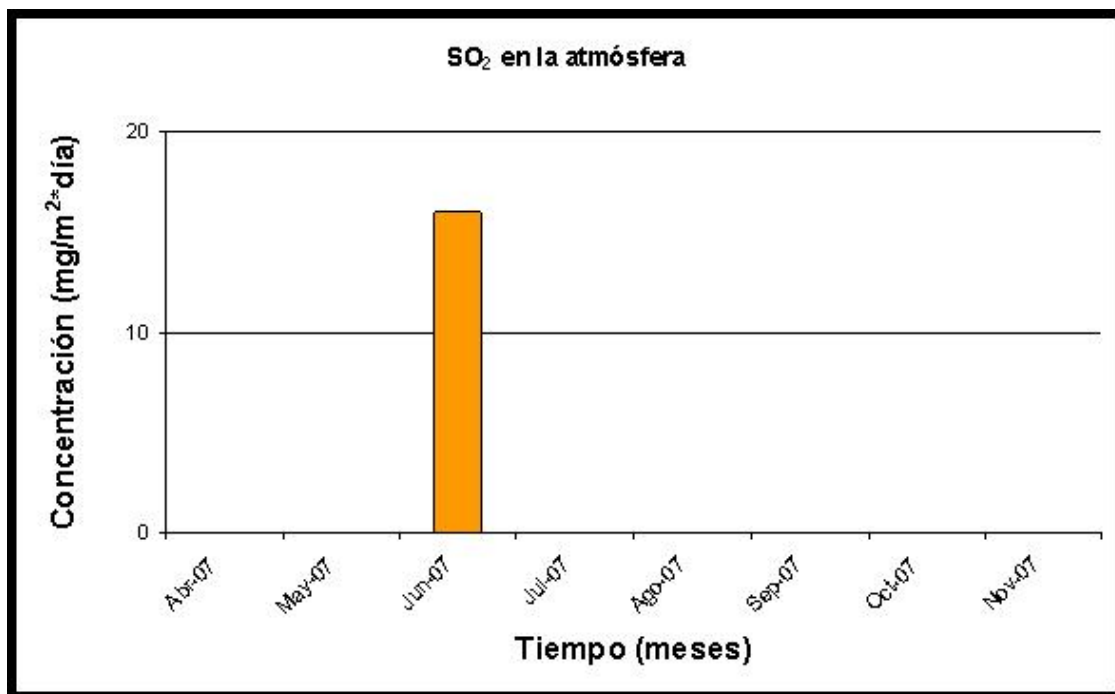


Figura N° 19. Estación Poás. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera ( $\text{SO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

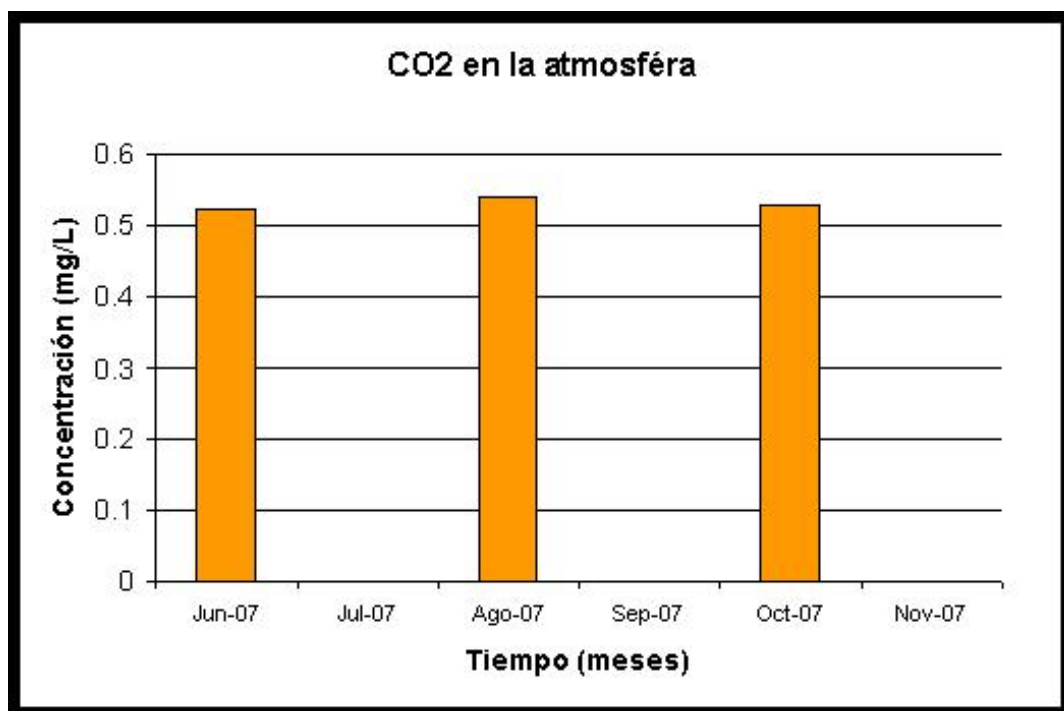


Figura N° 20. Estación Póas. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera ( $\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

## 2. Estación Pavas- Urbano/Industrial

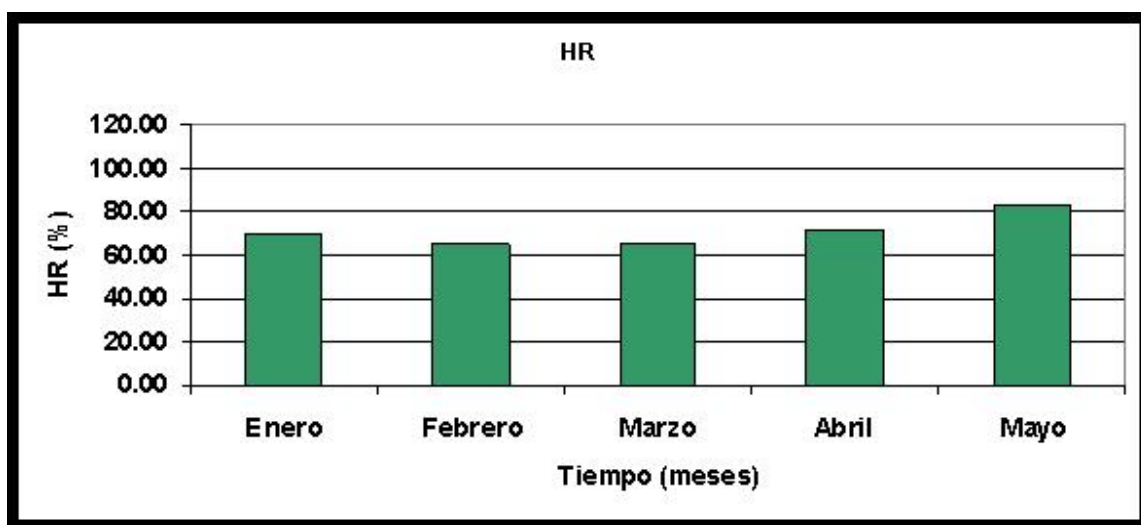


Figura N° 21. Estación Pavas. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.

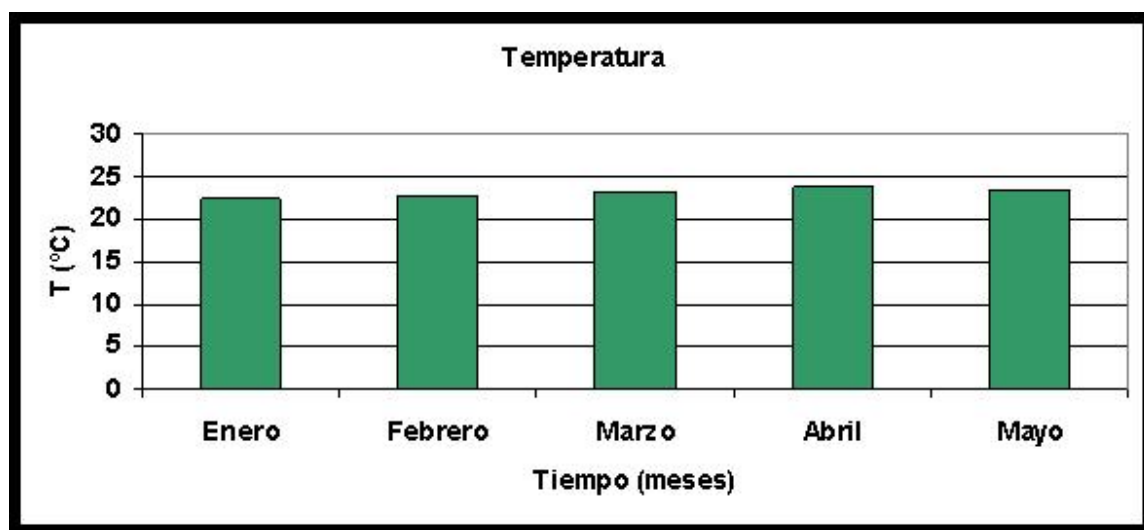


Figura N° 22. Estación Pavas. Evolución de la Temperatura (T/°C), durante el tiempo de exposición.

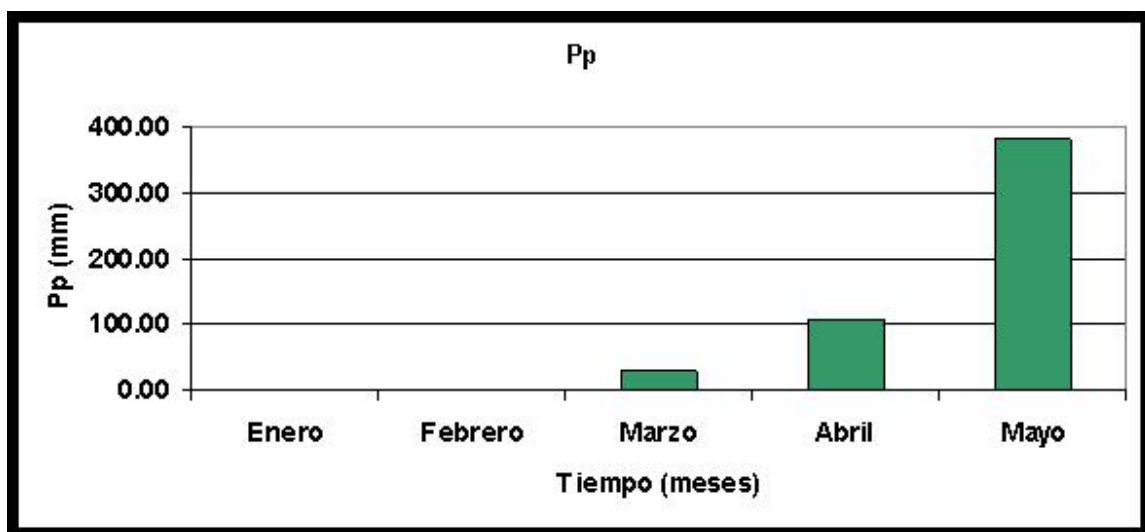


Figura N° 23. Estación Pavas. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

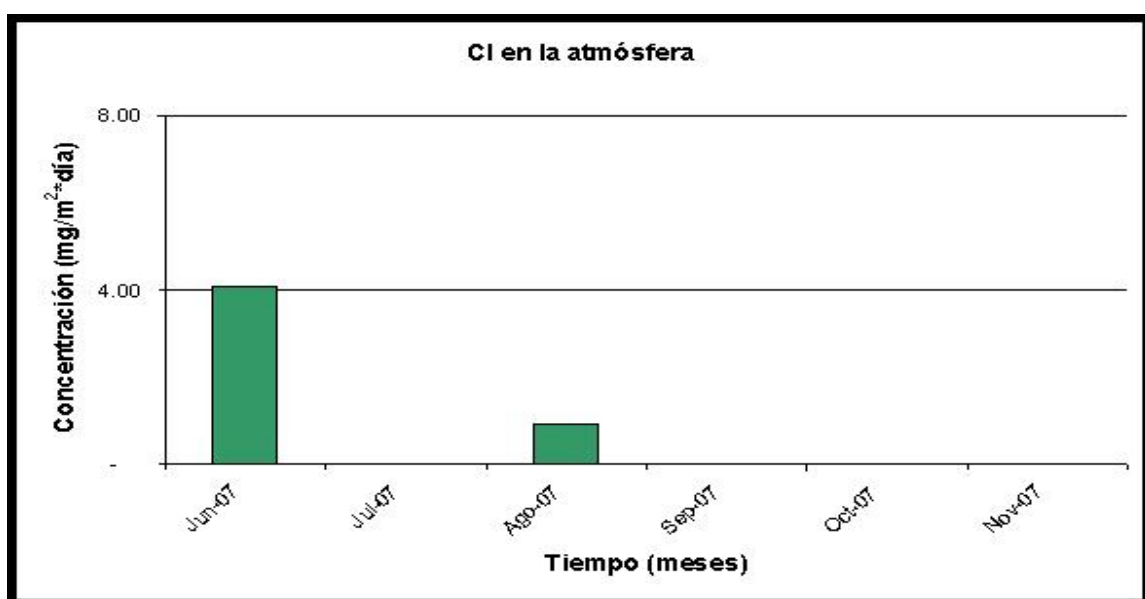


Figura N° 24. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera (Cl/mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

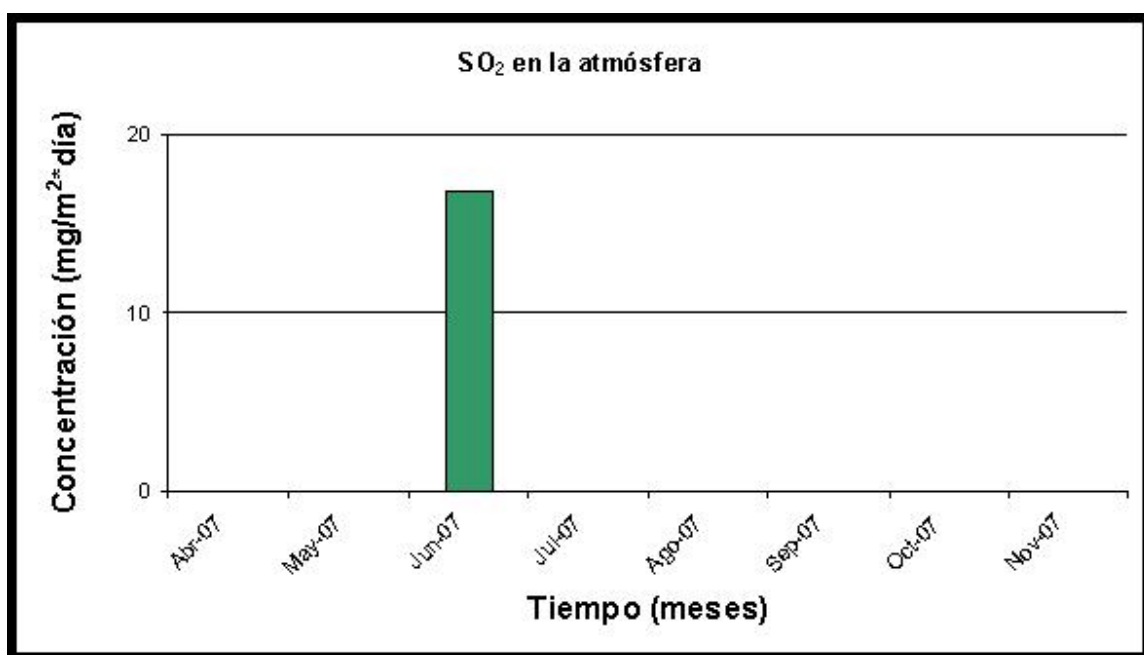


Figura N° 25. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera (SO<sub>2</sub>/mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

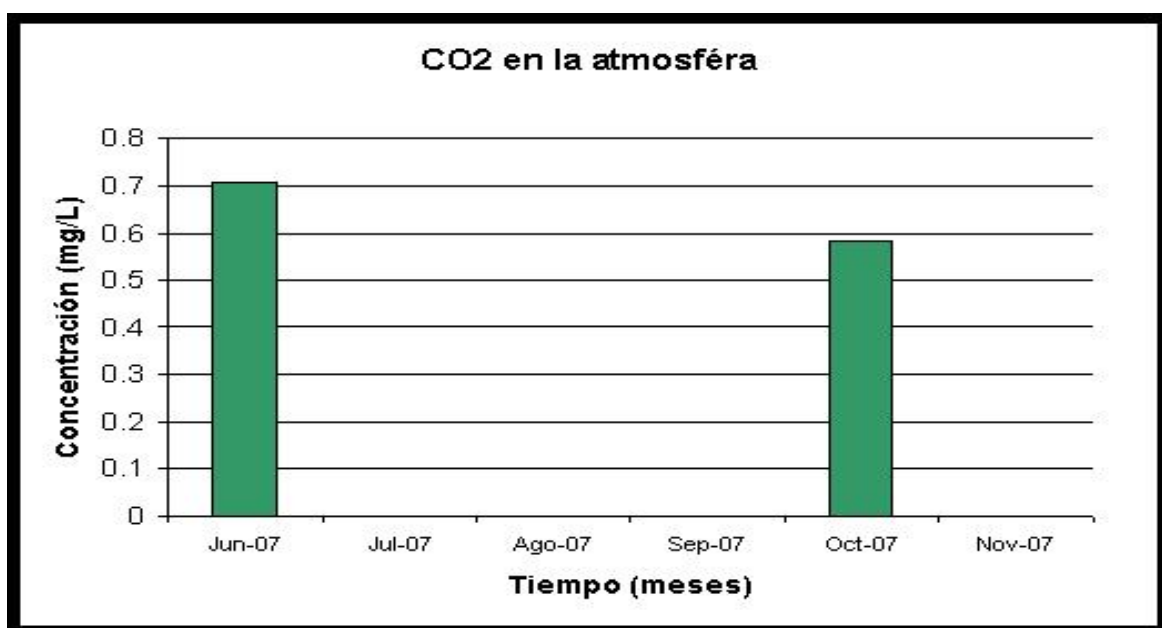


Figura N° 26. Estación Pavas. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera (CO<sub>2</sub>/mg.L<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

### 3. Estación San José- Urbana

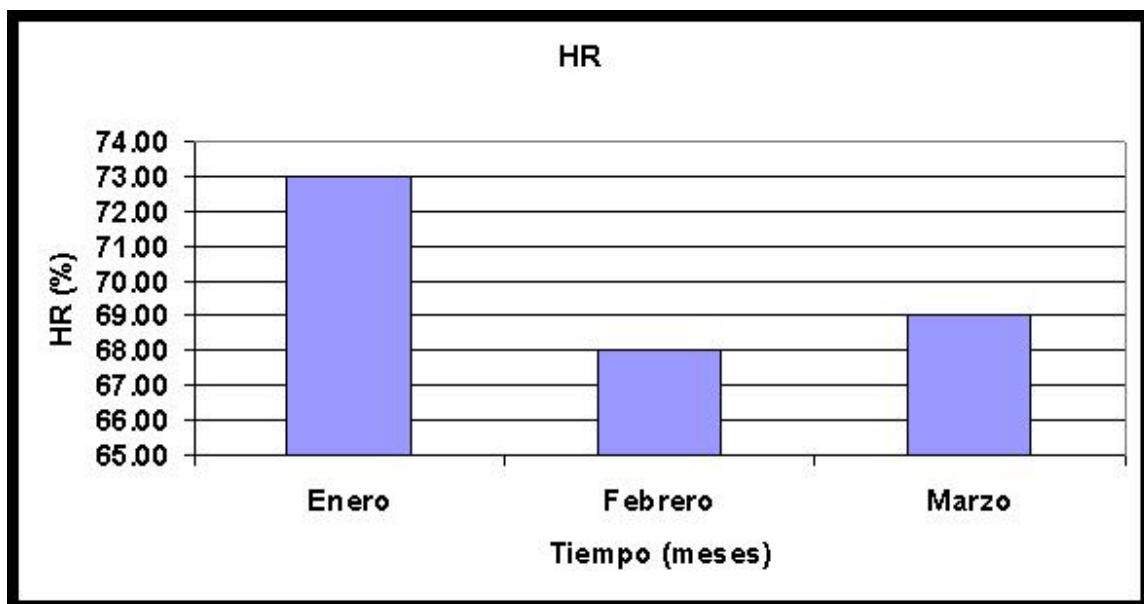


Figura N° 27. Estación San José. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.

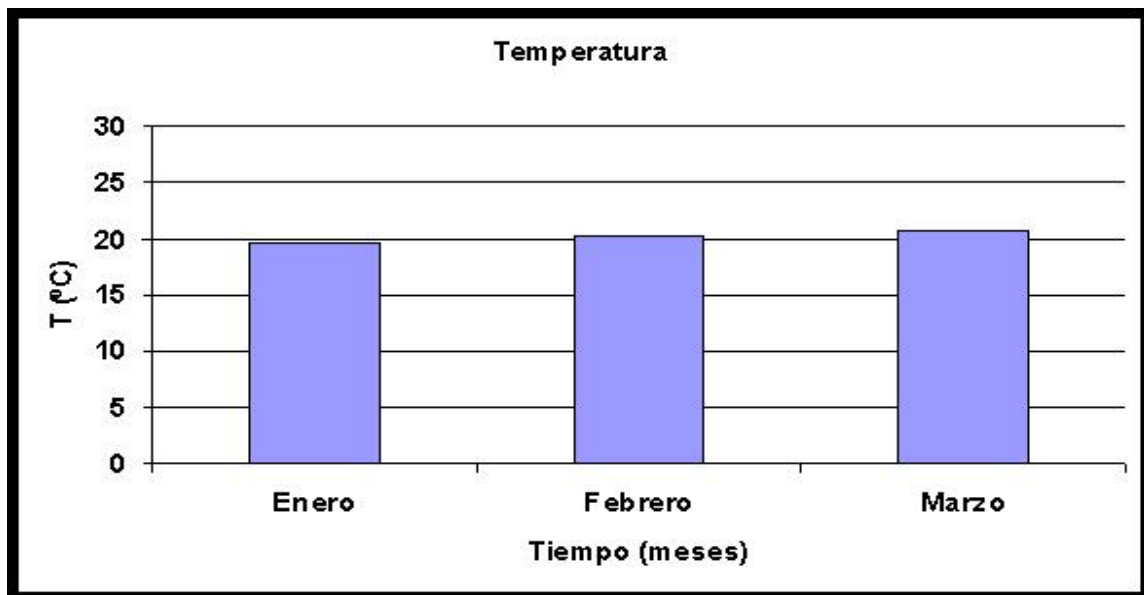


Figura N° 28. Estación San José. Evolución de la Temperatura (T/°C), durante el tiempo de exposición.



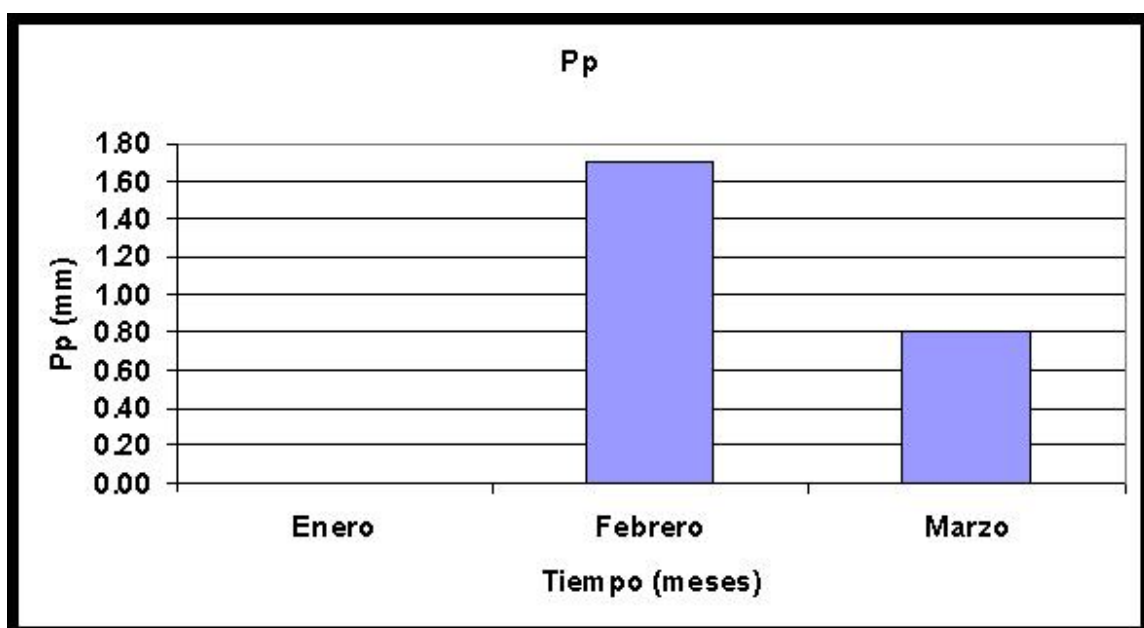


Figura N° 29. Estación San José. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

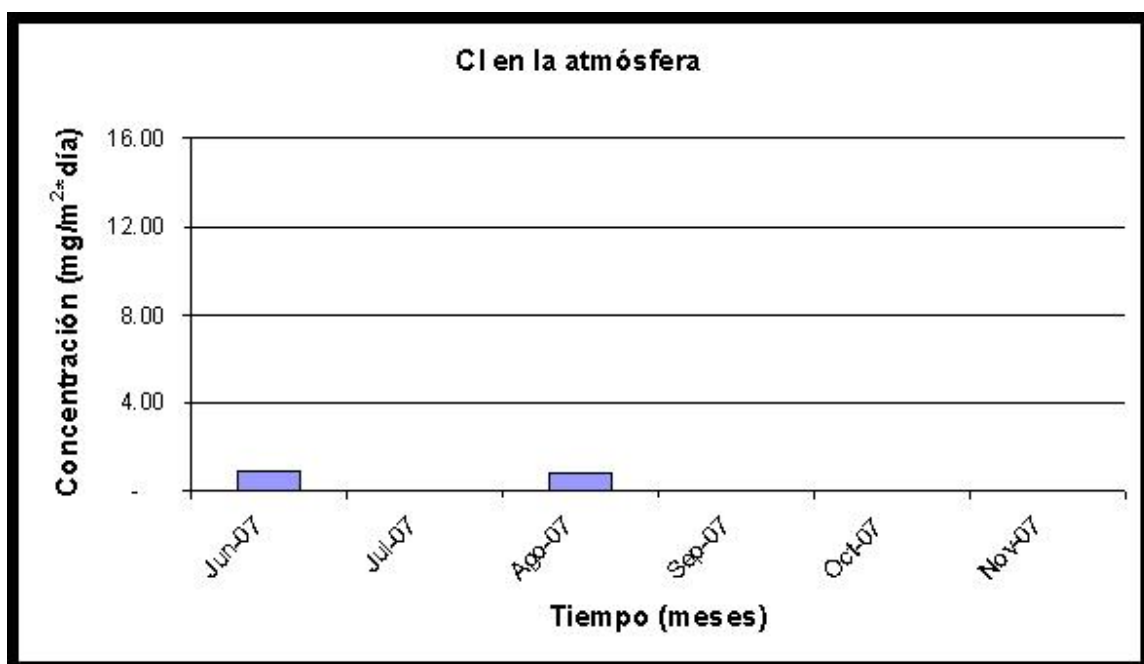


Figura N° 30. Estación San José. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera (Cl/mg.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

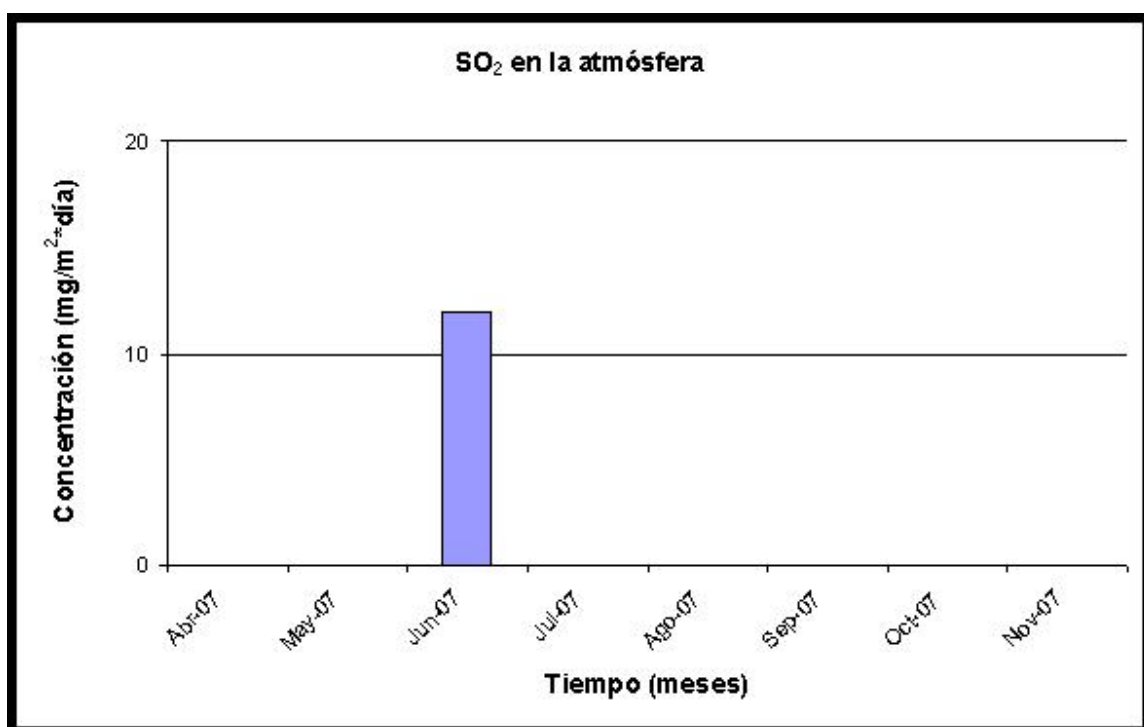


Figura N° 31. Estación San José. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera (SO<sub>2</sub>/mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

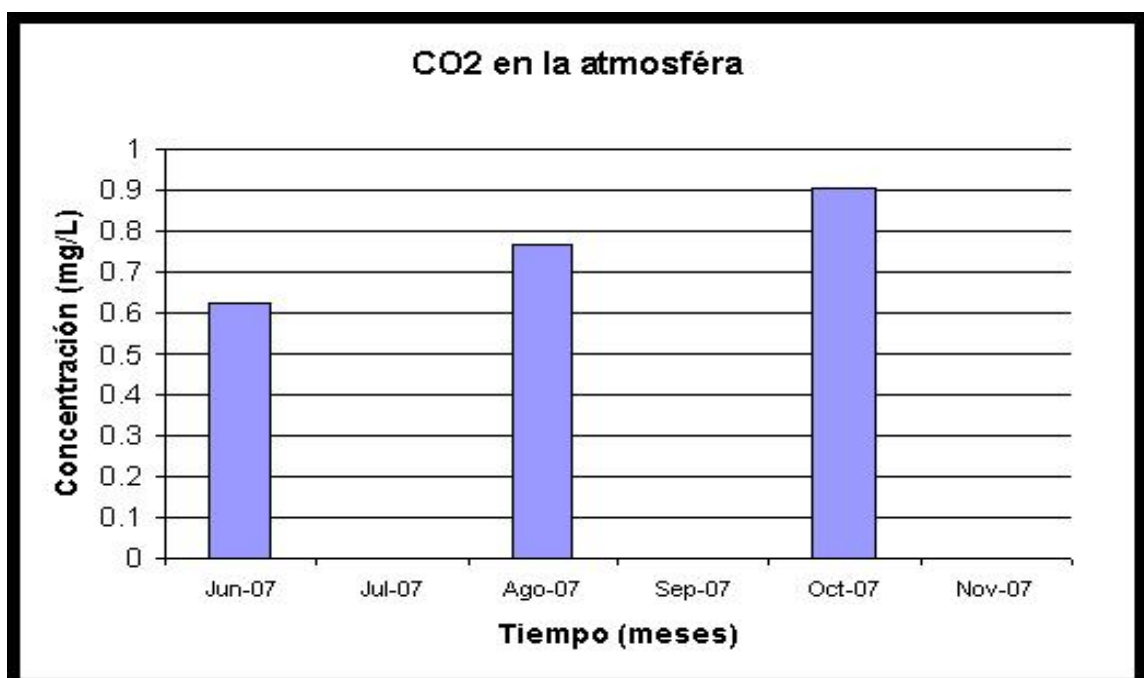


Figura N° 32. Estación San José. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera (CO<sub>2</sub>/mg.L<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

#### 4. Estación Moín- Marina

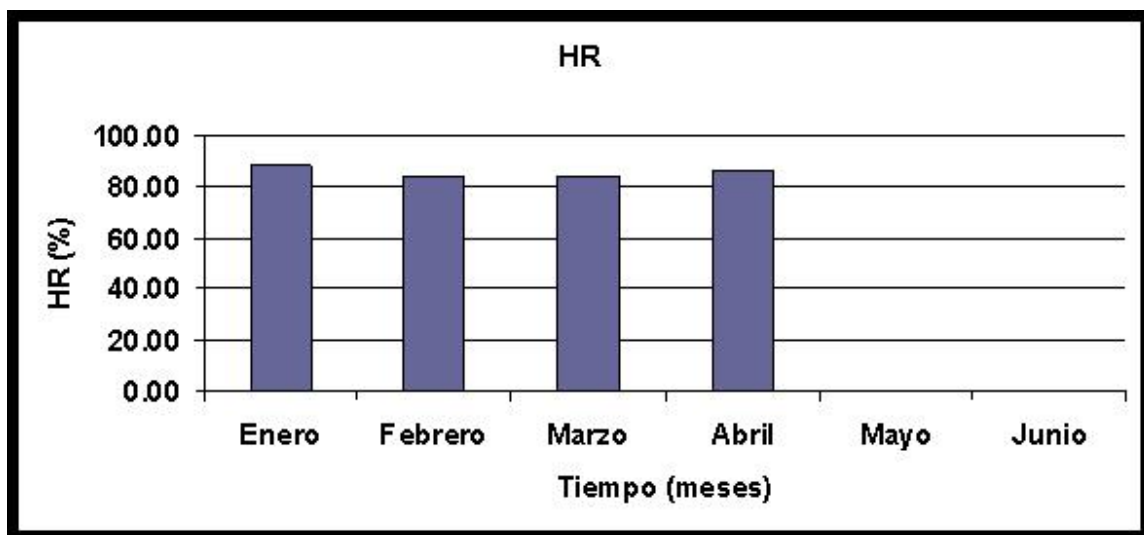


Figura N° 33. Estación Moín. Evolución de la humedad relativa (HR/%), durante el tiempo de exposición.

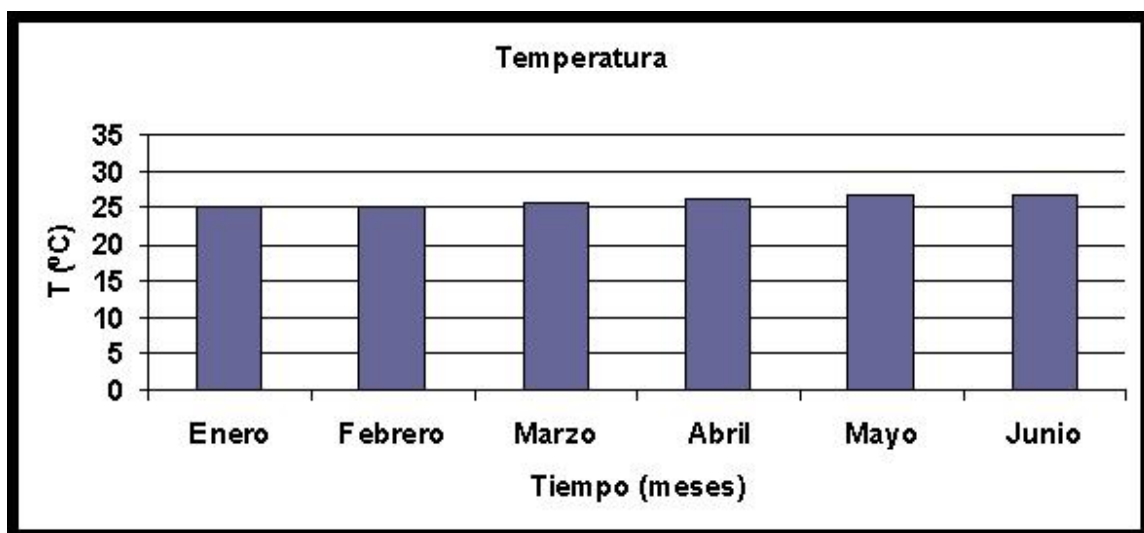


Figura N° 34. Estación Moín. Evolución de la Temperatura (T/°C), durante el tiempo de exposición.

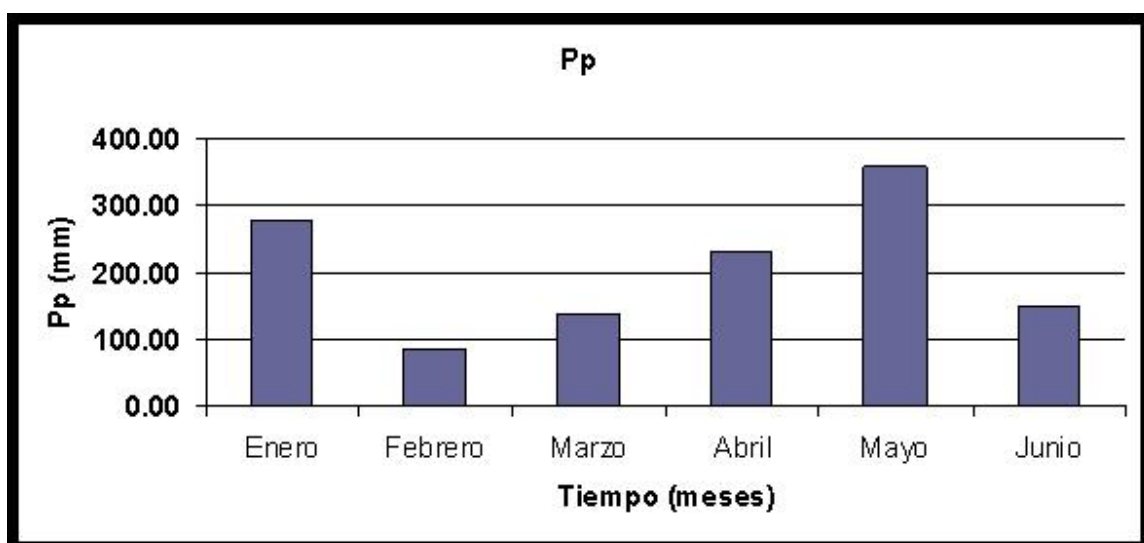


Figura N° 35. Estación Moín. Evolución de la Precipitación (Prec./mm.año<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

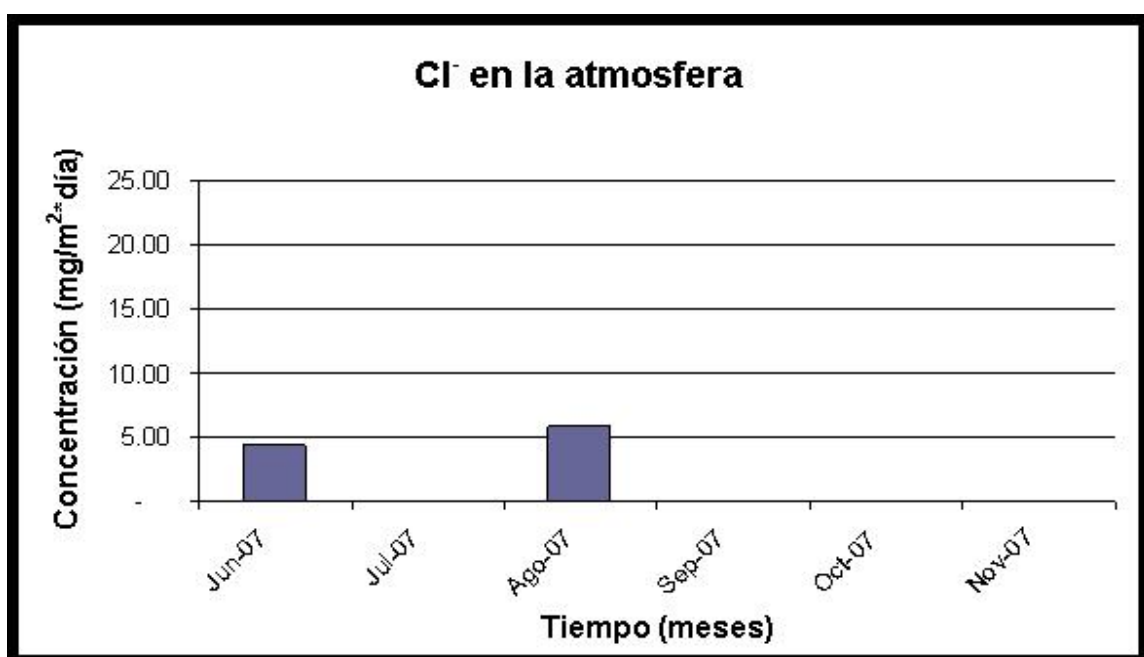


Figura N° 36. Estación Moín. Evolución del Contenido de Cloruros en la Atmósfera (Cl<sup>-</sup>/mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), durante el tiempo de exposición.

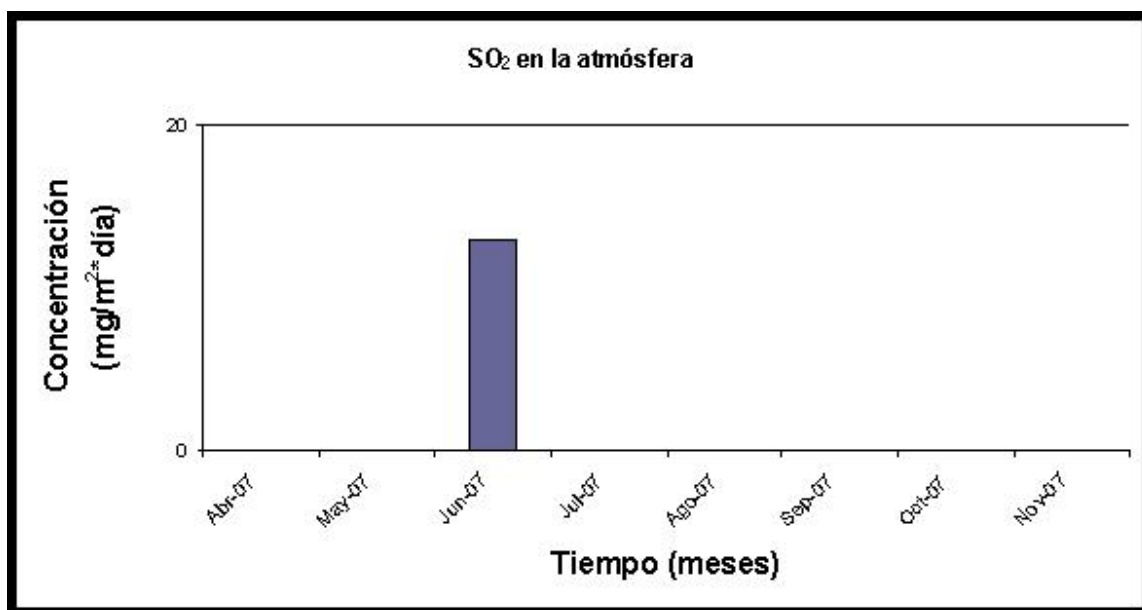


Figura N° 37. Estación Moín. Evolución del Contenido de Compuestos de Azufre en la Atmósfera ( $\text{SO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

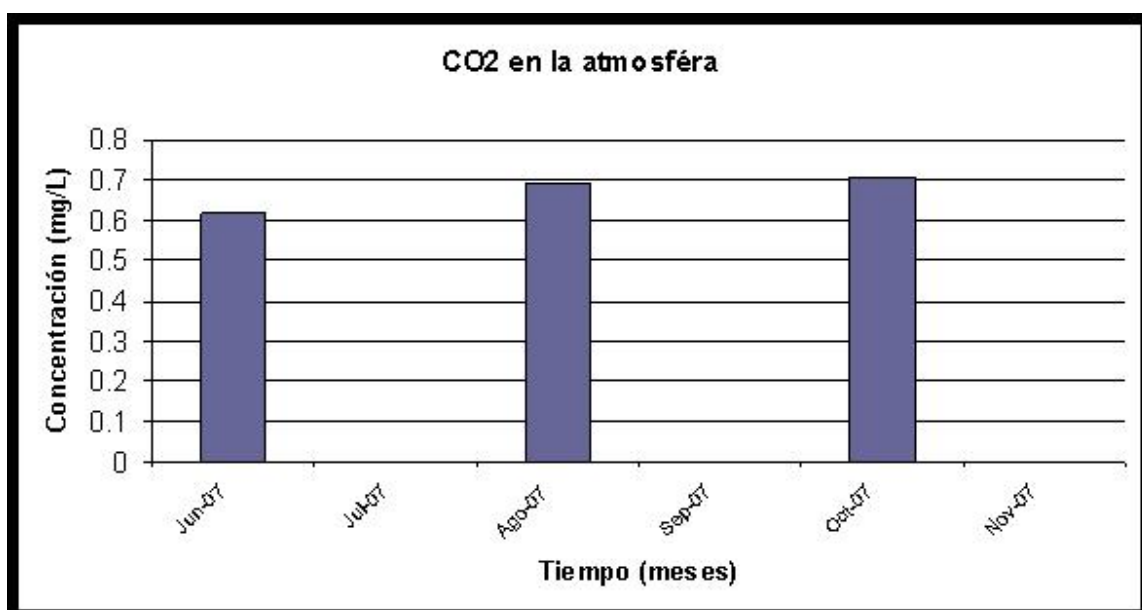


Figura N° 38. Estación Moín. Evolución del Contenido de Dióxido de Carbono en la Atmósfera ( $\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), durante el tiempo de exposición.

En el cuadro N° 2 se muestran los promedios de los parámetros meteoroquímicos de las estaciones.

Cuadro N° 2. Parámetros Meteoroquímicos (promedio) de las Estaciones

PARAMETROS	ESTACIONES			
	Poás	Pavas	San José	Moín
Temperatura, T (°C)	17,4	23,2	20,2	26,0
Humedad relativa, HR (%)	82,6	70,8	70,0	85,5
*Precipitación, Pp. (mm)	3592	1525	1796	3406
Velocidad del viento, V (m/s)	4,2	5,0	4,2	2,3
**Compuestos de azufre, SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	14,0	11,0	14,0	21,0
Cloruros, Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> día)	1,1	2,5	0,8	5,1
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub> (mg/L)	0,53	0,64	0,77	0,67

\*El dato mostrado corresponde al histórico reportado para el año 2006 por el Instituto Meteorológico Nacional, puesto que para el año 2007, aún no se dispone de dicha información.

\*\* Las muestras correspondientes al periodo de este proyecto de graduación fueron procesadas y se esta a la espera de los resultados de los análisis químicos. Por tanto el dato mostrado en este cuadro corresponde al promedio anual del año 2006.

## B. Identificación de las mezclas

En el cuadro N° 3 se muestran las características fisicoquímicas de los cementos utilizados en este proyecto.

Cuadro N° 3. Características Fisicoquímicas de los Cementos

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	P.I.	Cal Libre
21.50	5.00	3.85	62.50	0.95	0.33	0.43	2.50	---	---	---	---	---

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	Sup.Es p m <sup>2</sup> /kg
64.00	11.00	12.50	6.50	32x10 <sup>9</sup>

En el cuadro N° 4 se muestran las proporciones de las mezclas utilizadas en este proyecto.

Cuadro N° 4. Proporciones de las Mezclas utilizadas

MEZCLA	CONTENIDO (Kg/m <sup>3</sup> CONCRETO)/PROPORCIÓN				
	Cemento	Agua	Grava	Arena	Aditivo
<b>a/c: 0,65</b>	350	227.5	730.7	879.1	---
<b>a/c: 0,45</b>	400	180	850.8	837.6	---

En el cuadro N° 5 se muestran las propiedades físico-mecánicas de las mezclas.

Cuadro N° 5. Propiedades Físico-mecánicas de las Mezclas.

CARACTERISTICAS		MEZCLA	
		a/c: 0.65	a/c: 0.45
Resistencia a la Compresión (MPa)	28 d	20.1	39.1
	90 d	25.5	46.8
Resistencia a la Tracción (MPa)		2.4	2.7
Módulo de Elasticidad (GPa)		24.6	19.6
Resistividad, $\rho$ (K $\Omega$ .cm)		3.35	4.55
Absorción Total (%)		5.4	5.6
Porosidad Total (%)		9.4	7.5
Absorción Capilar (k/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> )*		0.026	0.021
Resistencia a penet. de agua, m (s/m <sup>2</sup> )*		3.73E+07	3.25E+07
Sorci3n Capilar, S (m/s <sup>1/2</sup> )		1.65E-04	1.76E-04
Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> )*		2278	2382
Permeabilidad a Cloruros ASTM C1202 (Coul)*		---	---



## C. Evaluación de la penetración de contaminantes en el concreto

### 1. Penetración de cloruros

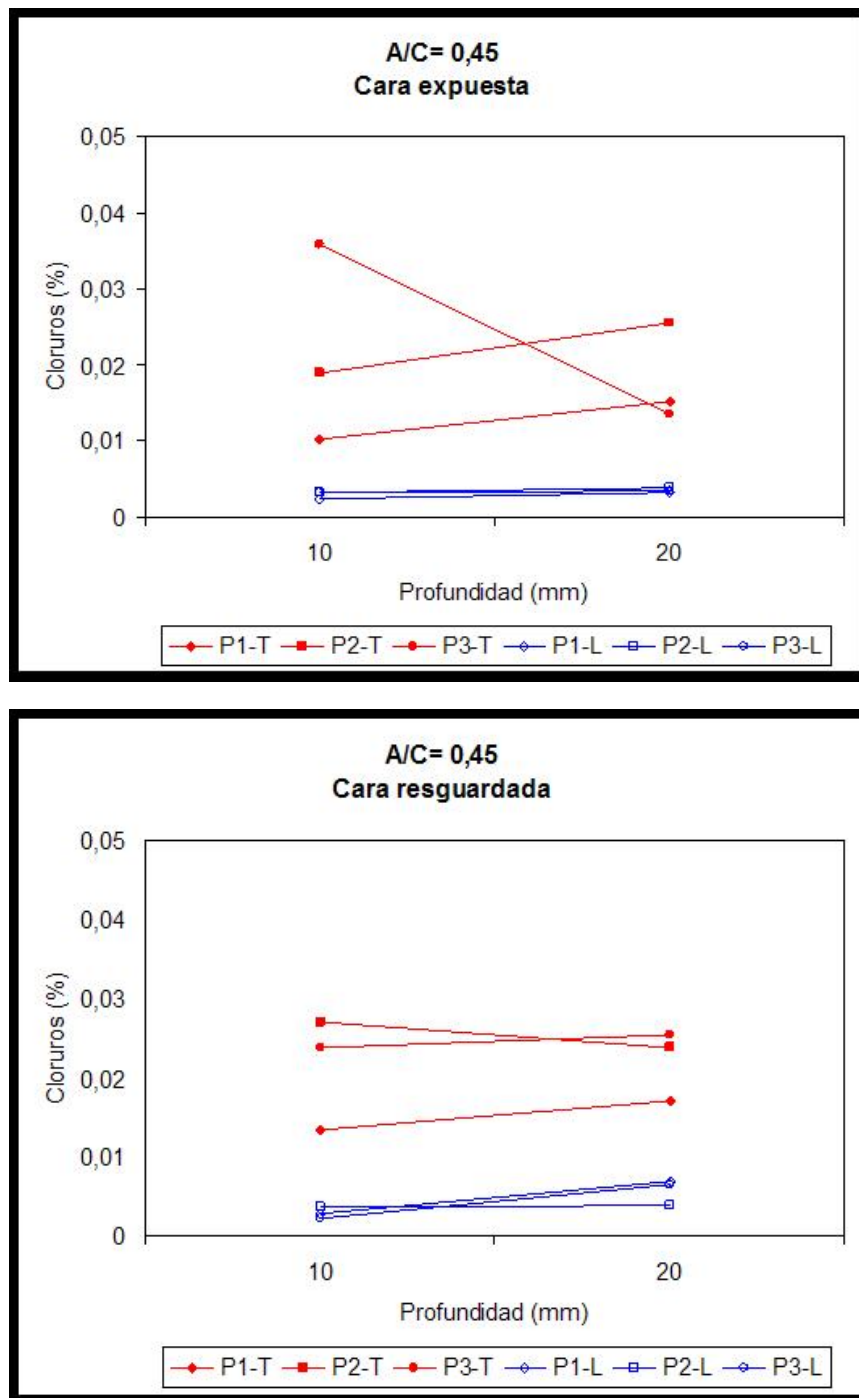


Figura N° 39. Estación Póas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de  $a/c = 0,45$ , tanto en cara expuesta como en cara resguardada.

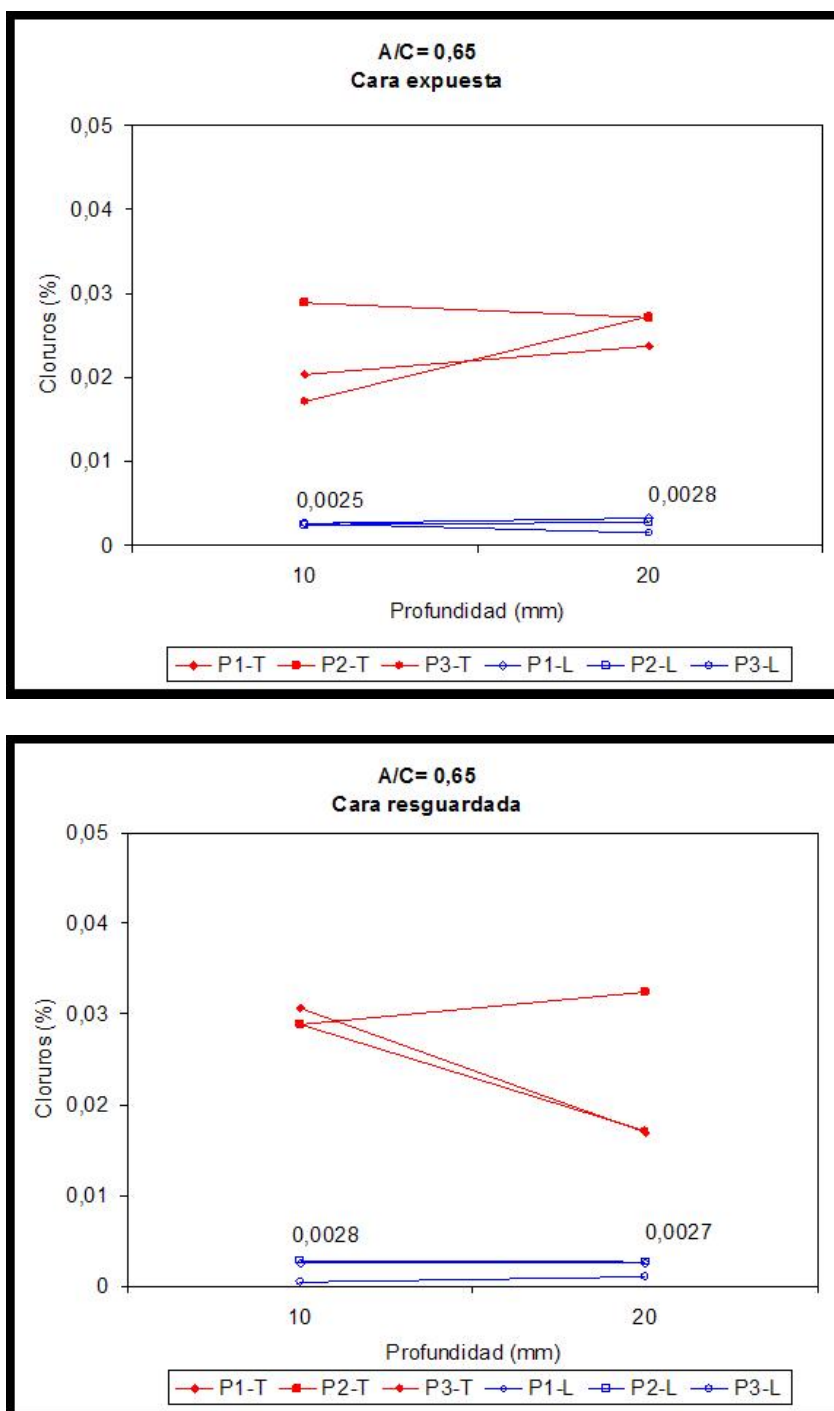


Figura N° 40. Estación Póas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de a/c = 0,65, tanto en cara expuesta como en cara resguardada.

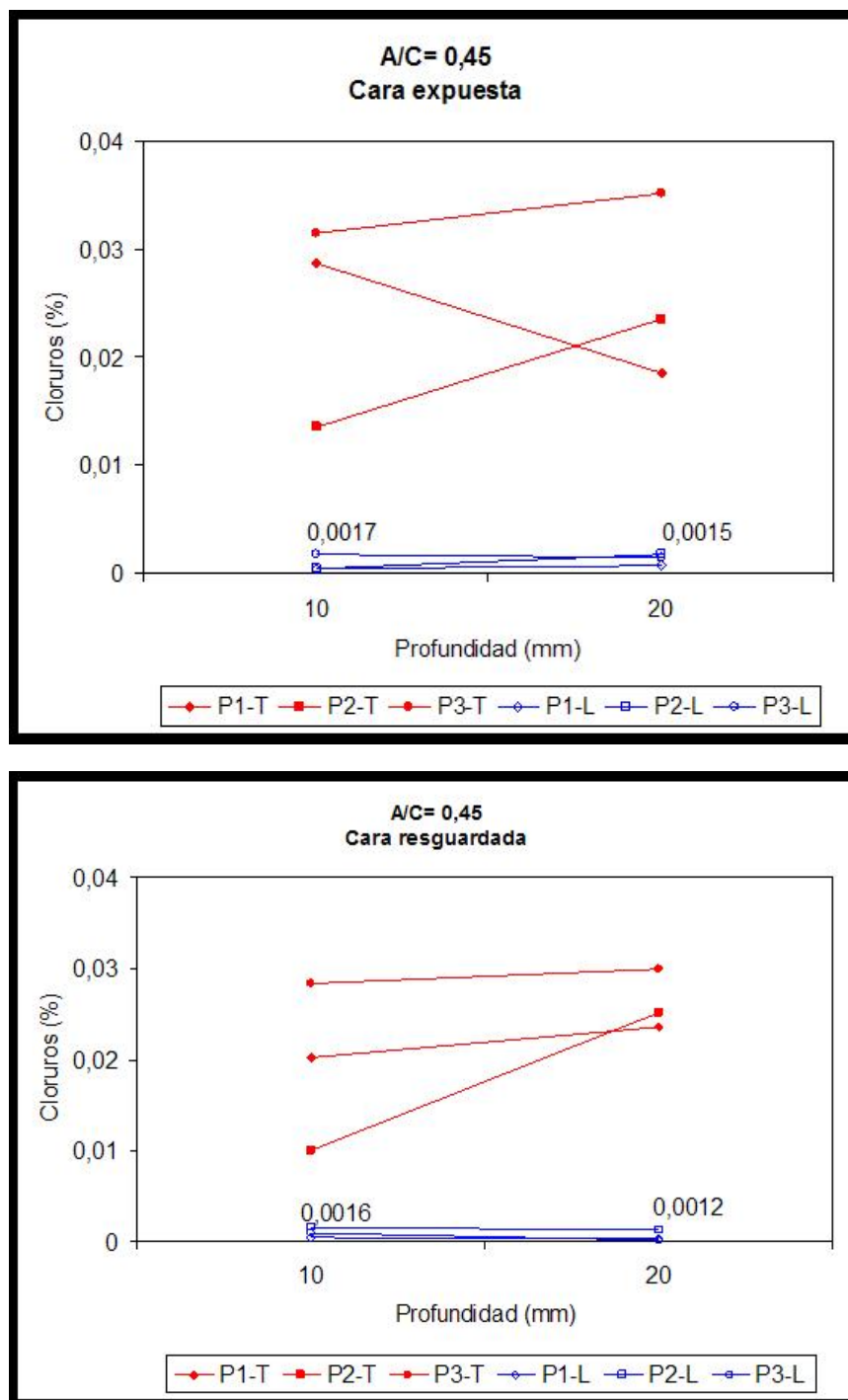


Figura N° 41. Estación Pavas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de a/c = 0,45, tanto en cara expuesta como en cara resguardada.

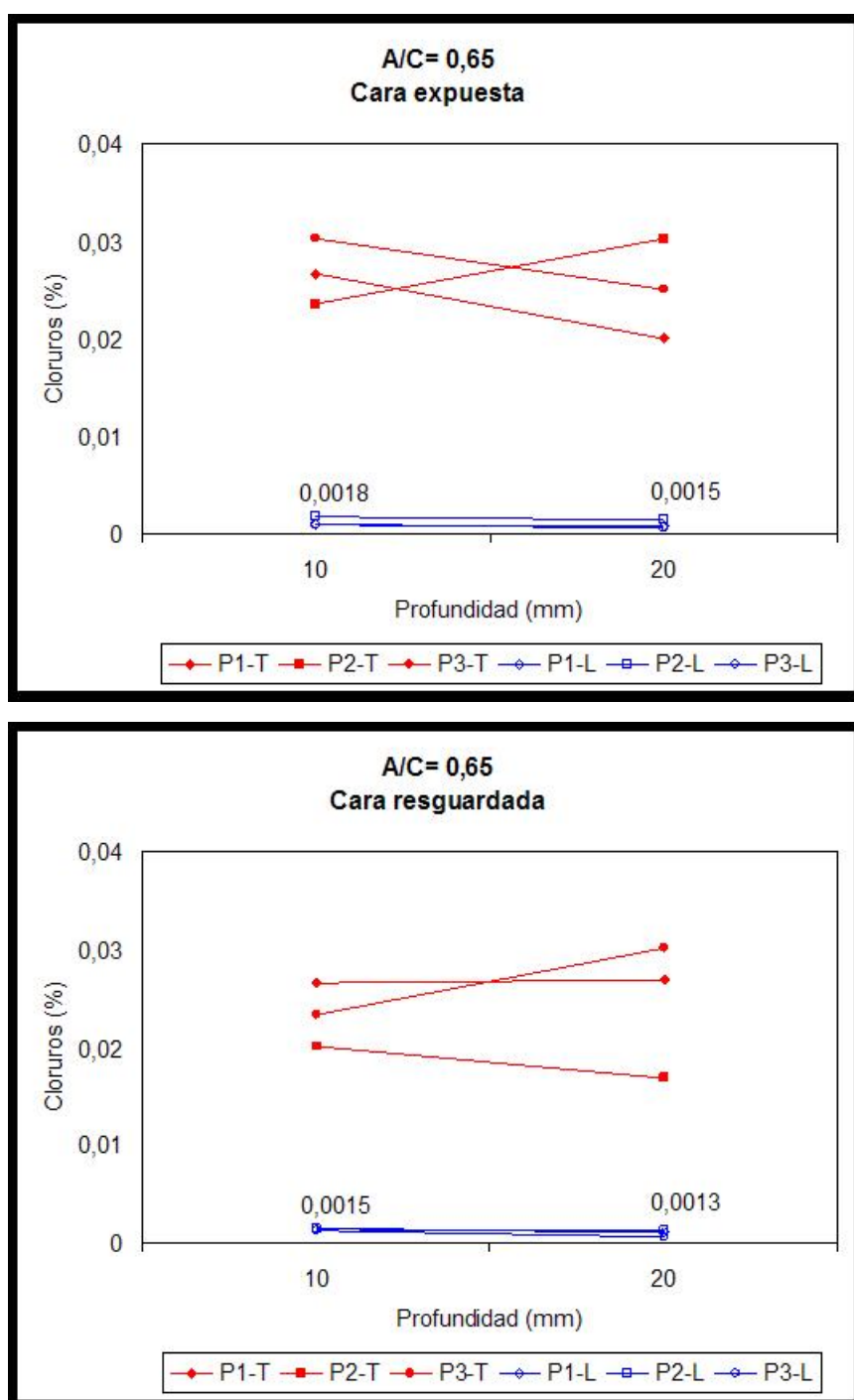


Figura N° 42. Estación Pavas. Perfil de Penetración de Iones Cloruro, Totales y Libres, en el Concreto de a/c = 0,65, tanto en cara expuesta como en cara resguardada.

\*\* Las muestras de las estaciones de San José y Moín fueron procesadas de igual forma. Los resultados de estos análisis no fueron proporcionados a tiempo por el laboratorio.

## 2. Resistividad y penetración de la carbonatación, $e_{CO_2}$

Los cuadros N° 6 y N° 7 muestran los resultados de la resistividad y la carbonatación para las diferentes mezclas durante el primer año de mediciones.

Cuadro N° 6.- Resultados de Resistividad y Carbonatación. Mezcla a/c = 0,45  
Primer año de mediciones (2006-2007)

Estación	Probeta	Mezcla a/c = 0,45					
		Cara Expuesta			Cara Resguardada		
		$\rho$ (K $\Omega$ .cm)	$e_{CO_2}$ (mm)	k (mm/a <sup>0,5</sup> )	$\rho$ (K $\Omega$ .cm)	$e_{CO_2}$ (mm)	k (mm/a <sup>0,5</sup> )
Poás	1	24,3	0,5	0,3	25,5	0	0,0
	2	27,5	0	0,0	23,6	0,2	0,1
	3	31,8	0	0,0	25,6	0,3	0,2
	Media	27,9	0,2	0,1	24,9	0,2	0,1
Pavas	1	23,9	7	4,9	27,1	4	2,8
	2	31,9	10	7,1	43,8	10	7,1
	3	35,1	3	2,1	29,4	3	2,1
	Media	30,3	6,7	4,7	33,4	5,7	4,0
San José	1	24,2	2	1,4	24,9	1	0,7
	2	21,2	0	0,0	25,0	2	1,4
	3	45,5	1	0,7	38,7	2	1,4
	Media	30,3	1	0,7	29,5	1,7	1,2
Moín	1	25,8	1,4	1,0	35,5	0,4	0,3
	2	38,1	0	0,0	32,6	0,6	0,4
	3	38,7	1,4	1,0	33,4	1	0,7
	Media	34,2	0,9	0,6	33,8	0,7	0,5

Cuadro N° 7.- Resultados de Resistividad y Carbonatación. Mezcla a/c = 0,65  
Primer año de mediciones (2006-2007)

Estación	Probeta	Mezcla a/c = 0,65					
		Cara Expuesta			Cara Resguardada		
		$\rho$ (K $\Omega$ .cm)	$e_{CO_2}$ (mm)	k (mm/a <sup>0,5</sup> )	$\rho$ (K $\Omega$ .cm)	$e_{CO_2}$ (mm)	k (mm/a <sup>0,5</sup> )
Poás	1	18,5	1,1	0,8	17,5	1,4	1,0
	2	24,7	1,9	1,3	24,8	0	0,0
	3	26,4	1,3	0,9	30,0	2,2	1,5
	Media	23,2	1,4	1,0	24,1	1,2	0,8
Pavas	1	15,3	3	2,1	27,3	0	0,0
	2	34,8	10	7,1	45,7	8	5,6
	3	25,2	8	5,6	21,7	8	5,6
	Media	25,1	7	4,9	31,6	5,3	3,7
San José	1	38,5	8	5,6	28,1	5	3,5
	2	13,6	8	5,6	26,2	7	4,9
	3	20,5	7	4,9	13,9	5	3,5
	Media	24,2	7,7	5,4	22,7	5,7	4,0
Moín	1	25,3	5,1	3,6	22,9	6,7	4,7
	2	20,3	5,7	4,0	14,1	2,6	1,8
	3	34,5	9,3	6,6	38,9	7,1	5,0
	Media	26,7	6,7	4,7	25,3	5,5	3,9

## D. Medidas Electroquímicas

### 1. Equipos de medida

El cuadro N° 8 muestra los equipos utilizados en las pruebas electroquímicas.

Cuadro N° 8. Equipo utilizado en las mediciones electroquímicas

Potencial	Velocidad de Corrosión	Resistividad
<div data-bbox="325 689 774 1023" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="300 1055 857 1126" data-label="Caption"> <p><b>Potenciostato-Galvanostato Marca ACM Instruments, modelo Gill 08 AC</b></p> </div> <div data-bbox="255 1155 603 1617" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="620 1303 826 1413" data-label="Caption"> <p><b>Potenciostato-Galvanostato Marca Gamry</b></p> </div>	<div data-bbox="1002 862 1409 1162" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="1007 1234 1404 1272" data-label="Caption"> <p><b>Resistómetro Marca Megger</b></p> </div>	

## 2. Resultados de las medidas electroquímicas

### 2.1 Estación Poás

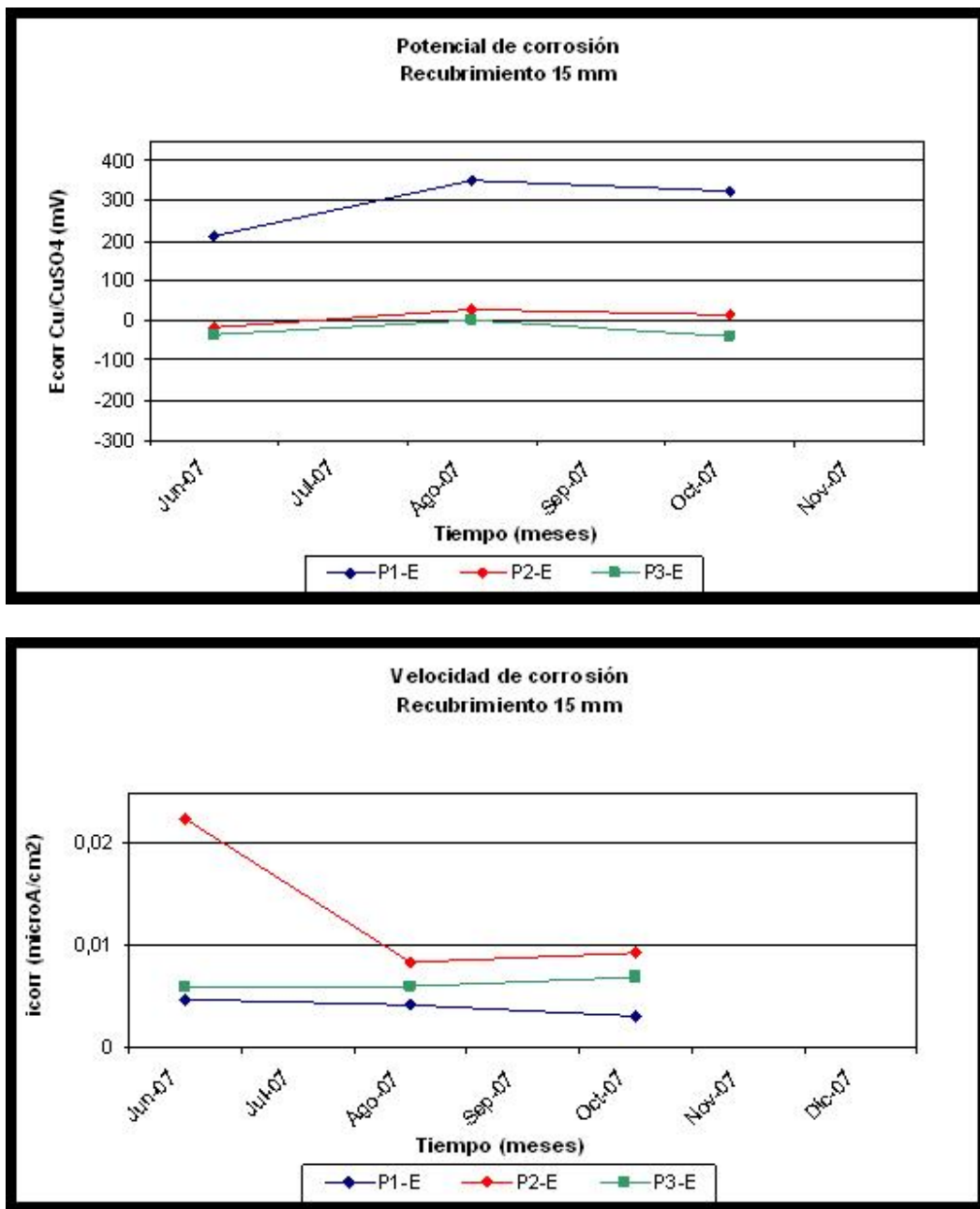


Figura N° 43. Estación Poás. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).



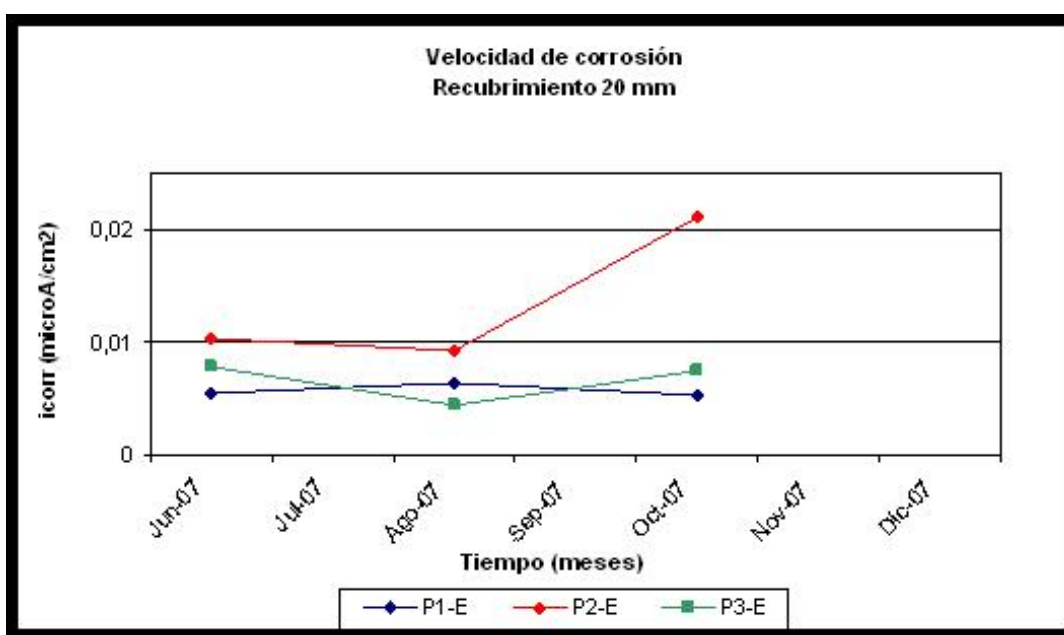
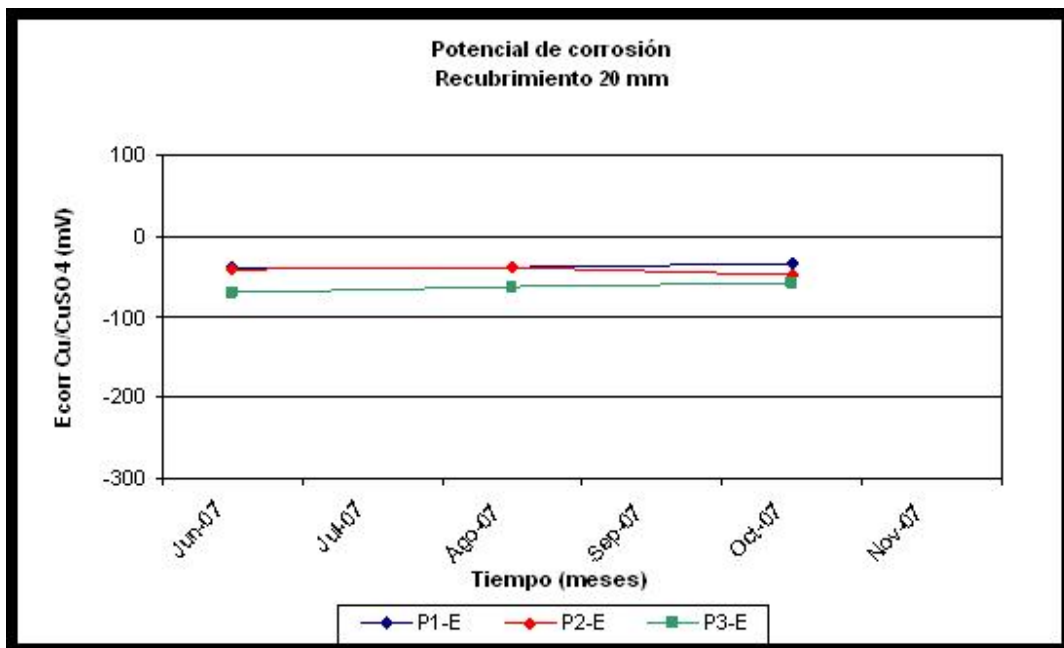


Figura N° 44. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

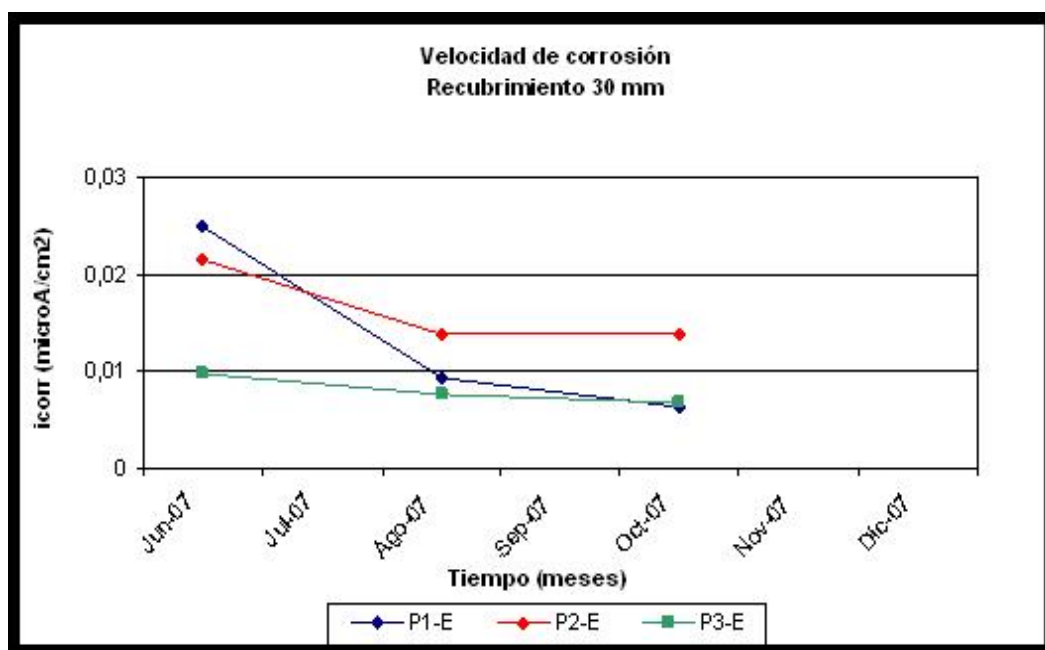
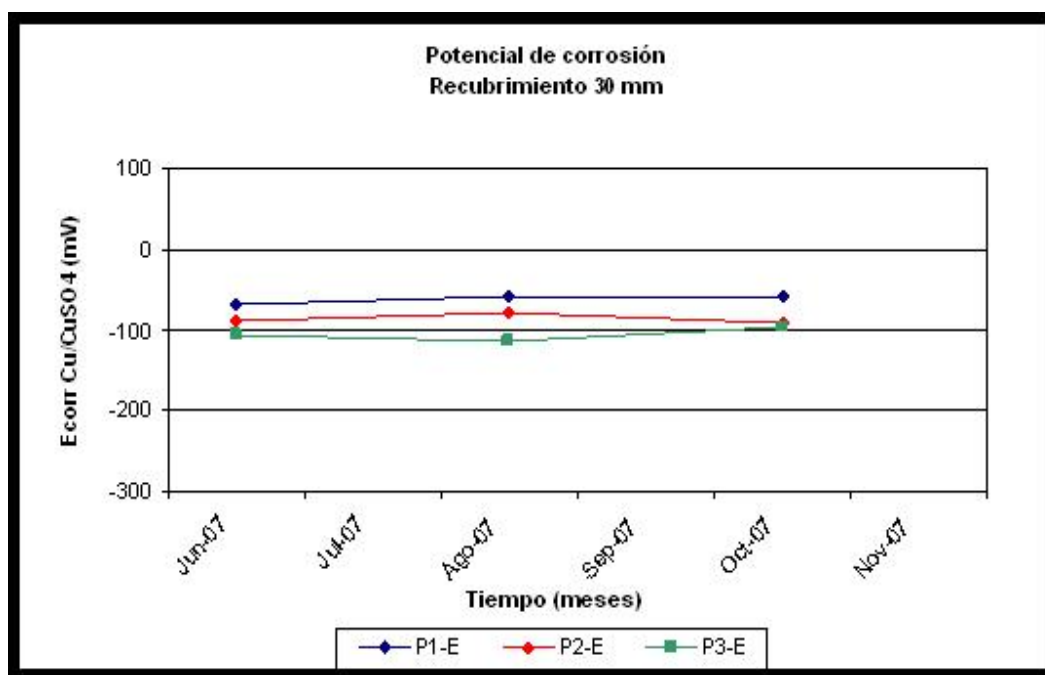


Figura N° 45. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).

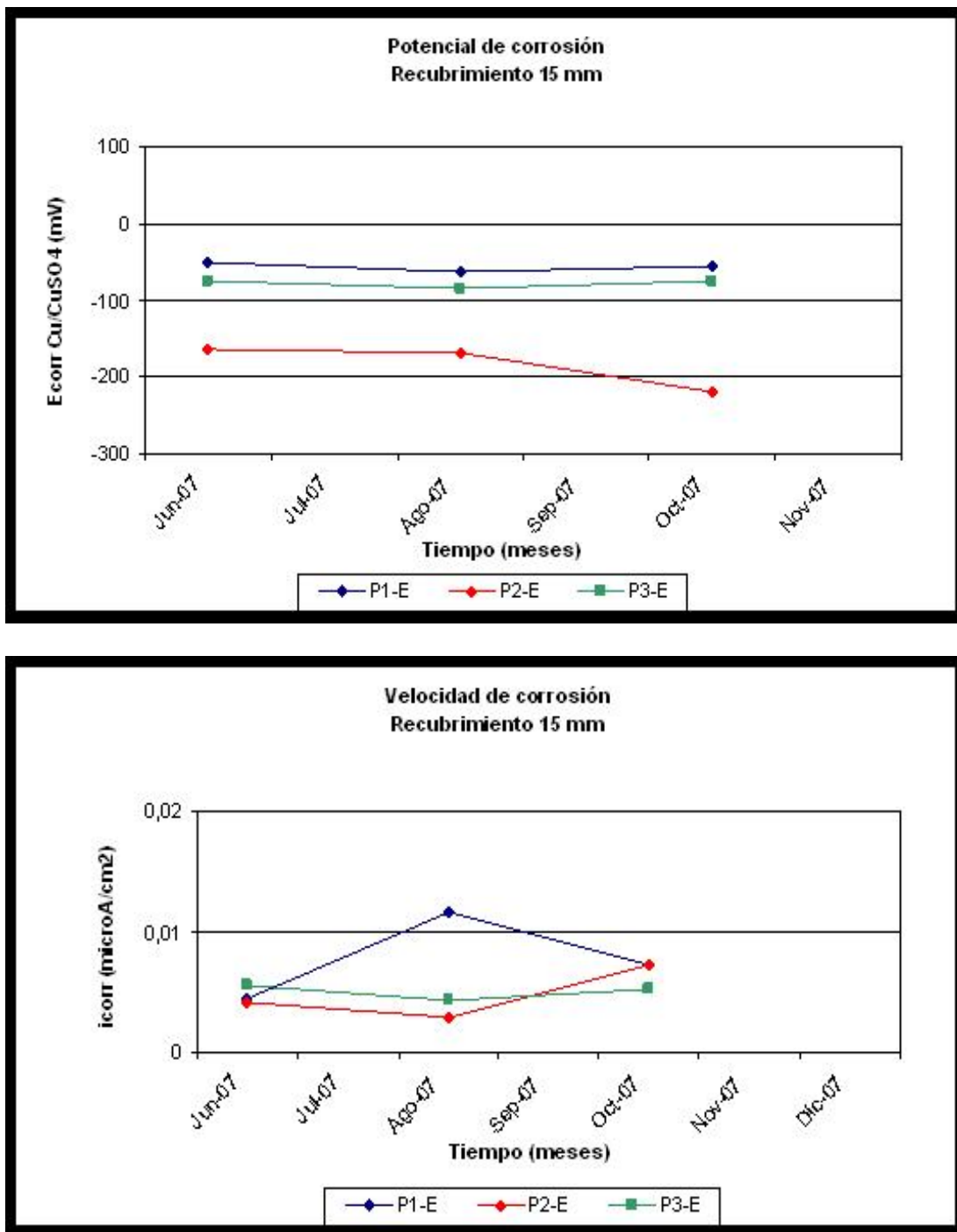


Figura N° 46. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

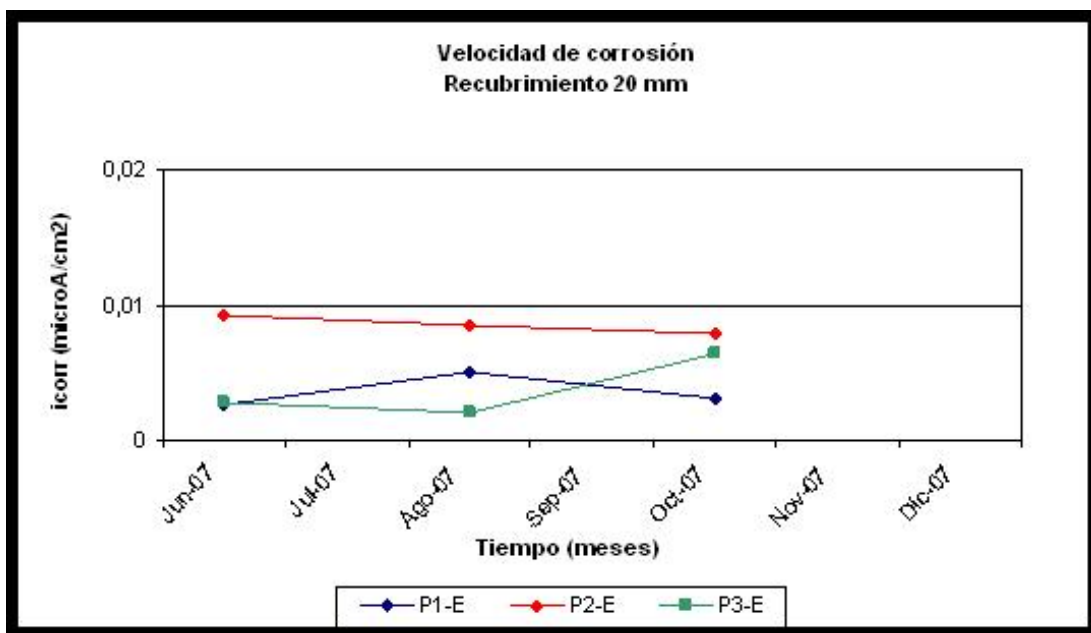
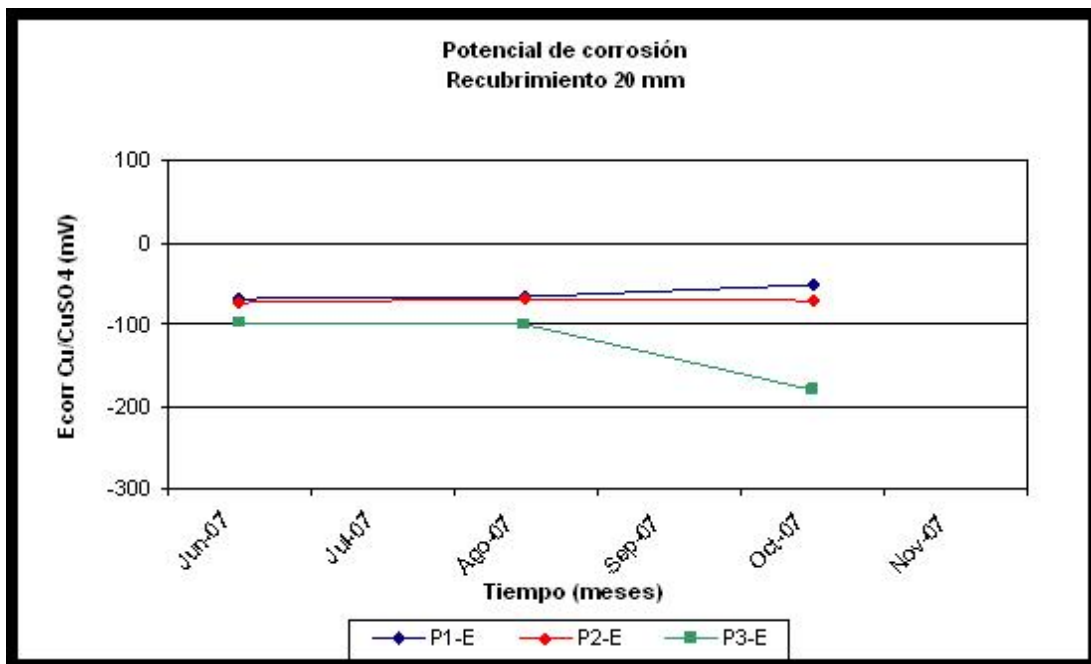


Figura N° 47. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).

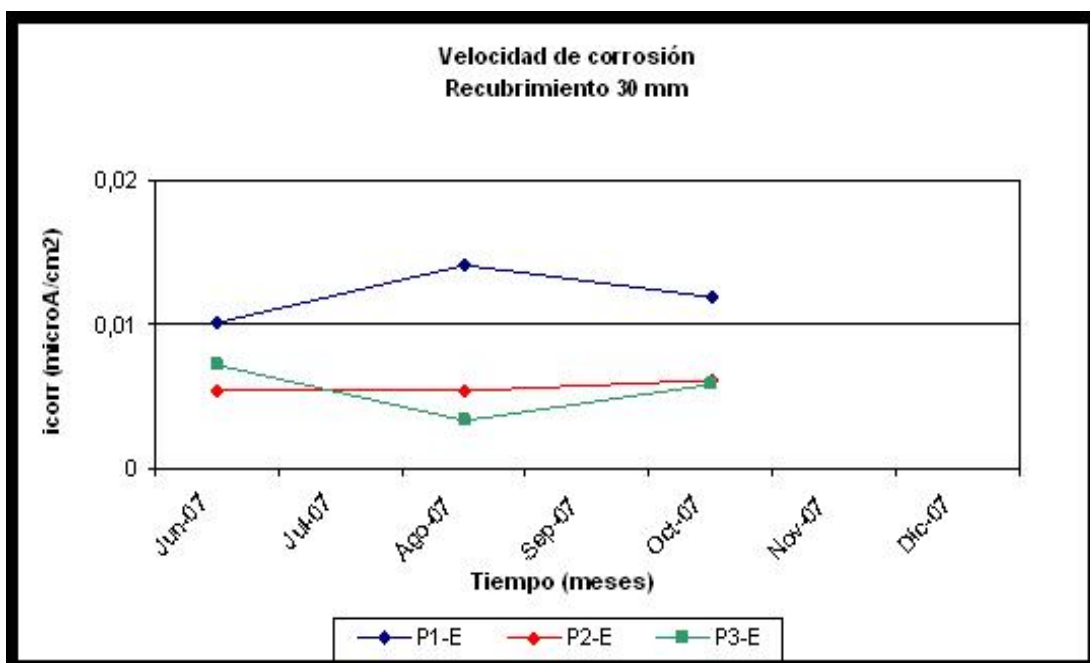
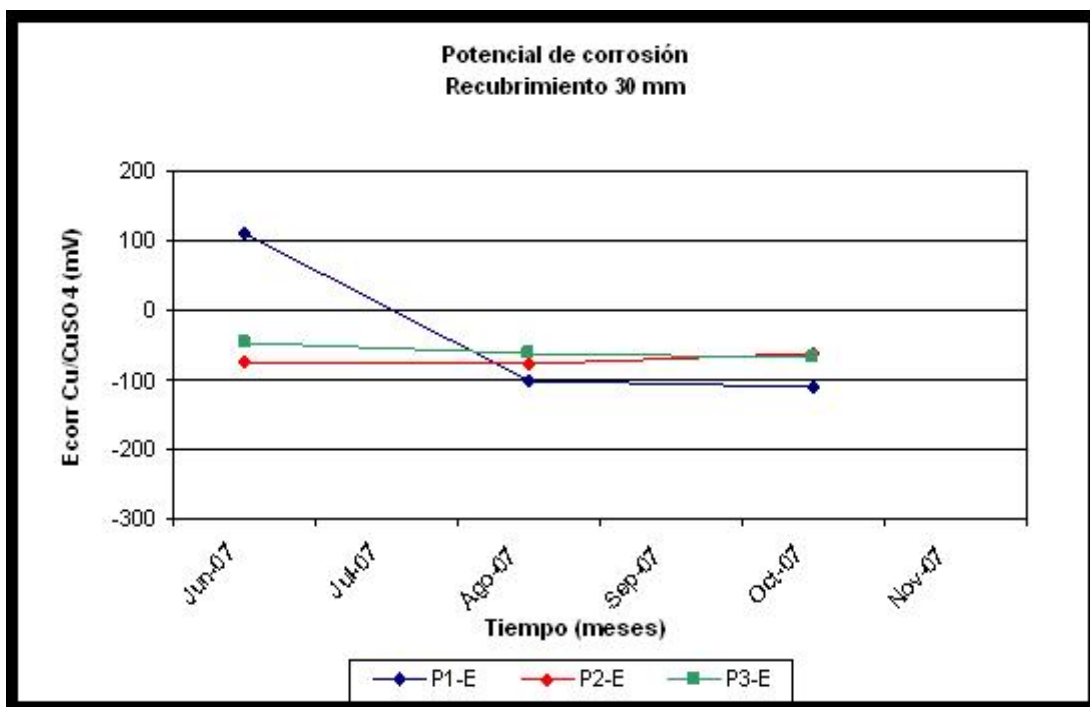


Figura N° 48. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).

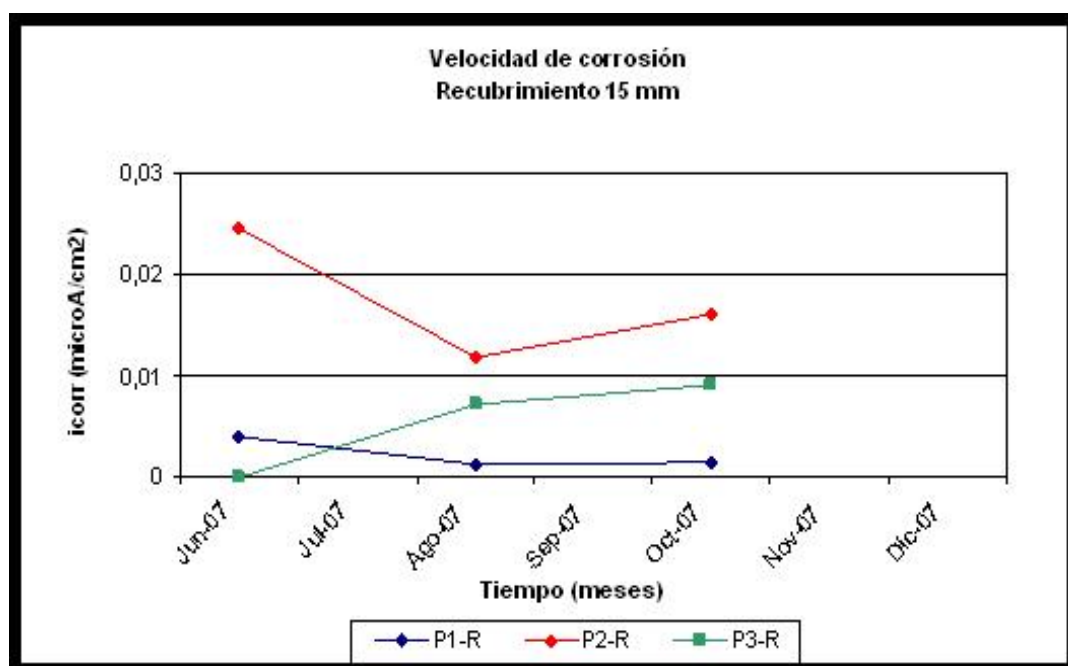
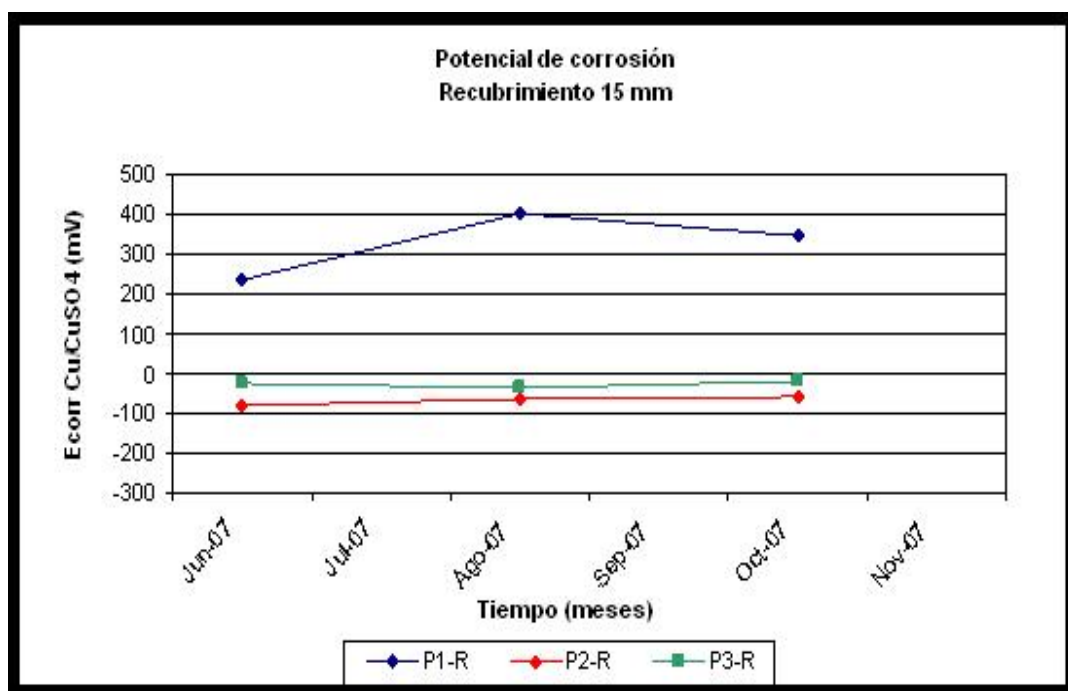


Figura N° 49. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).

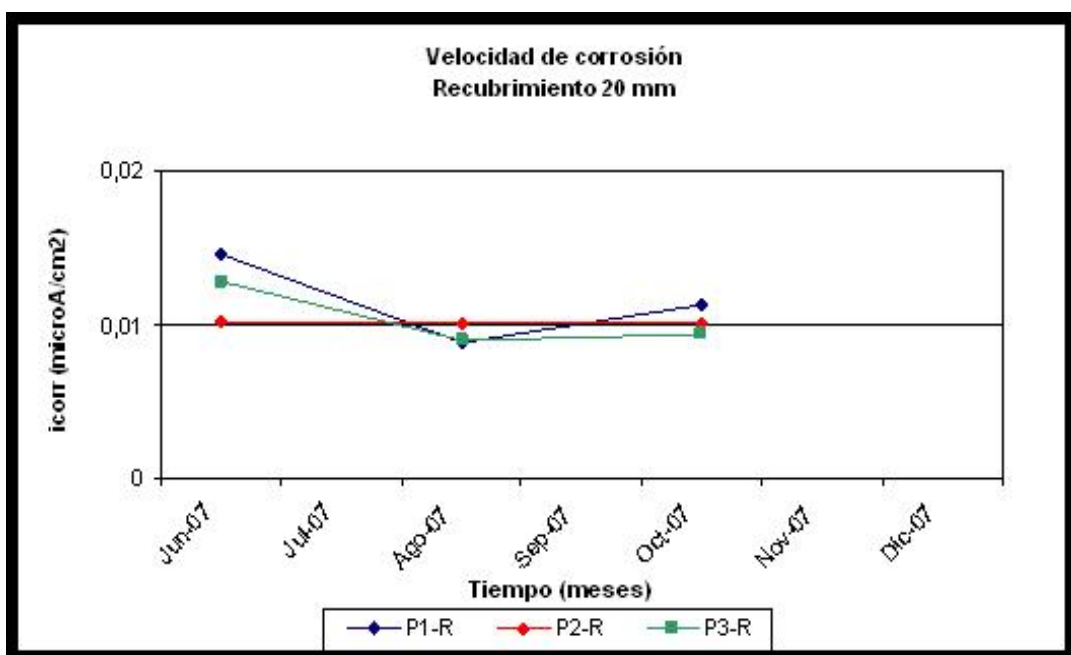
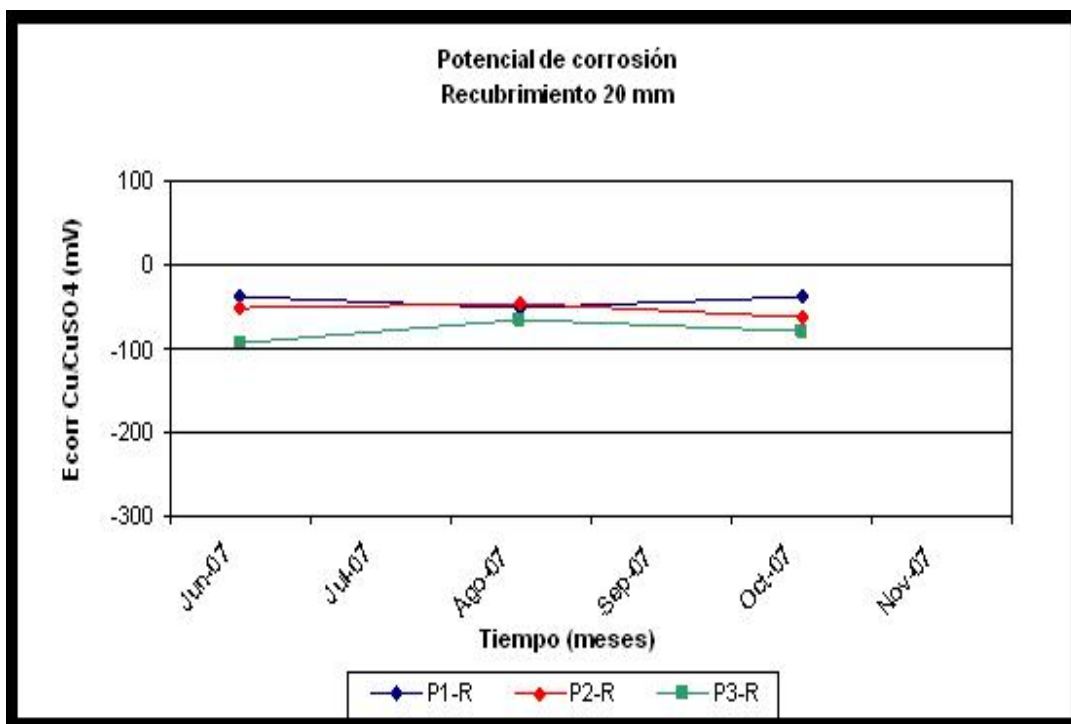


Figura N° 50. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).

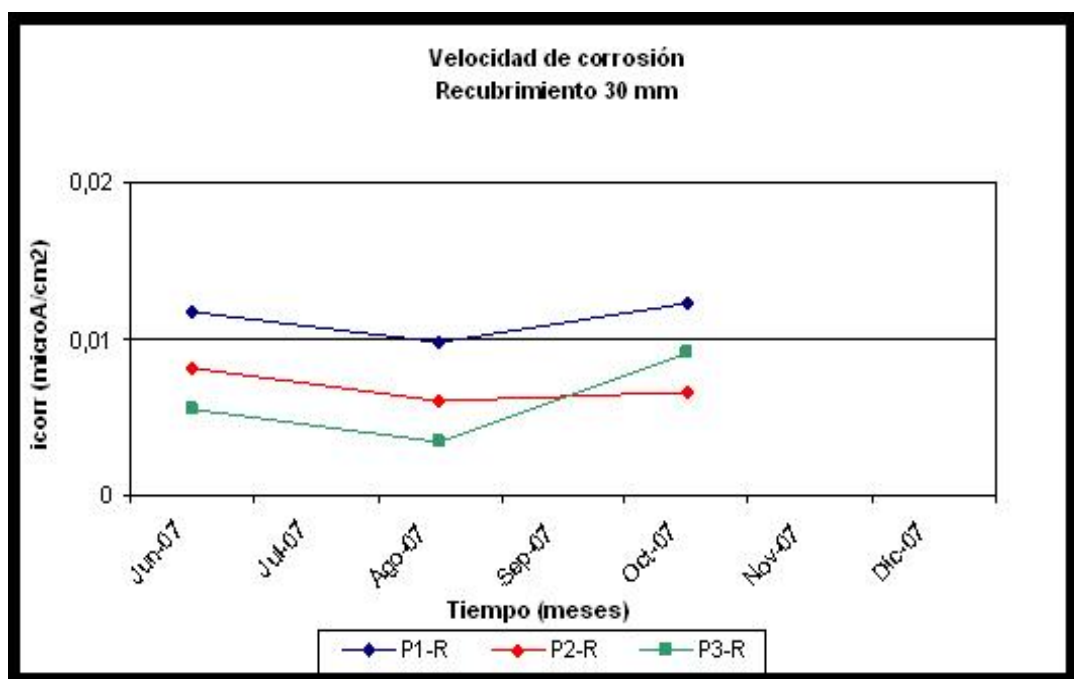
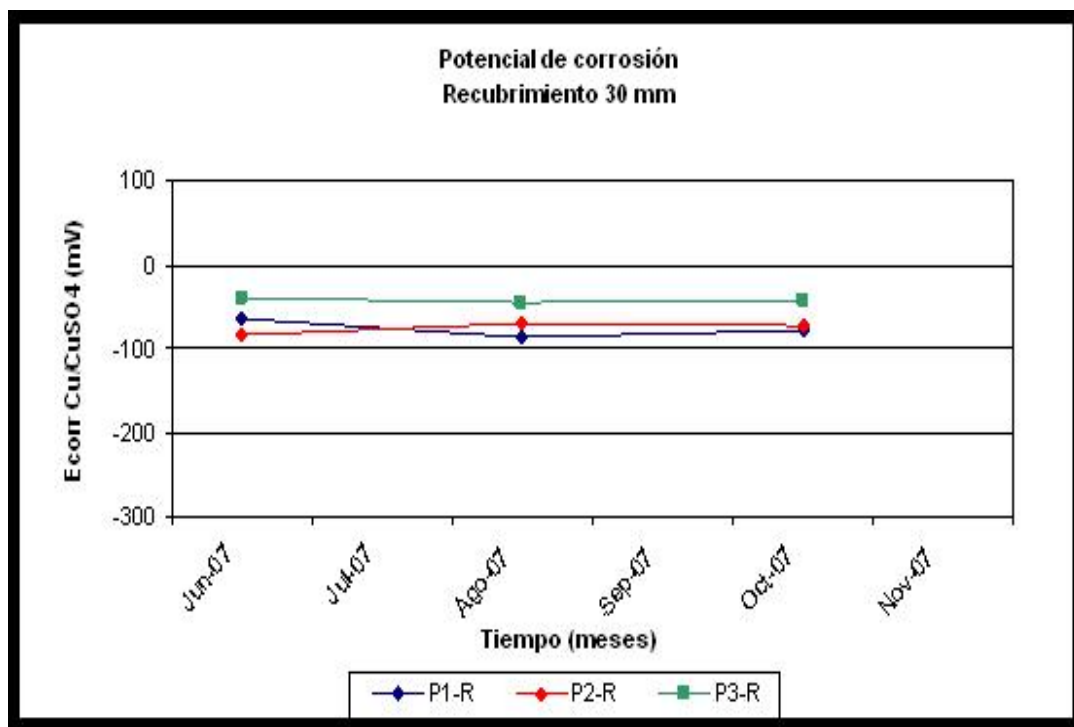


Figura N° 51. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).



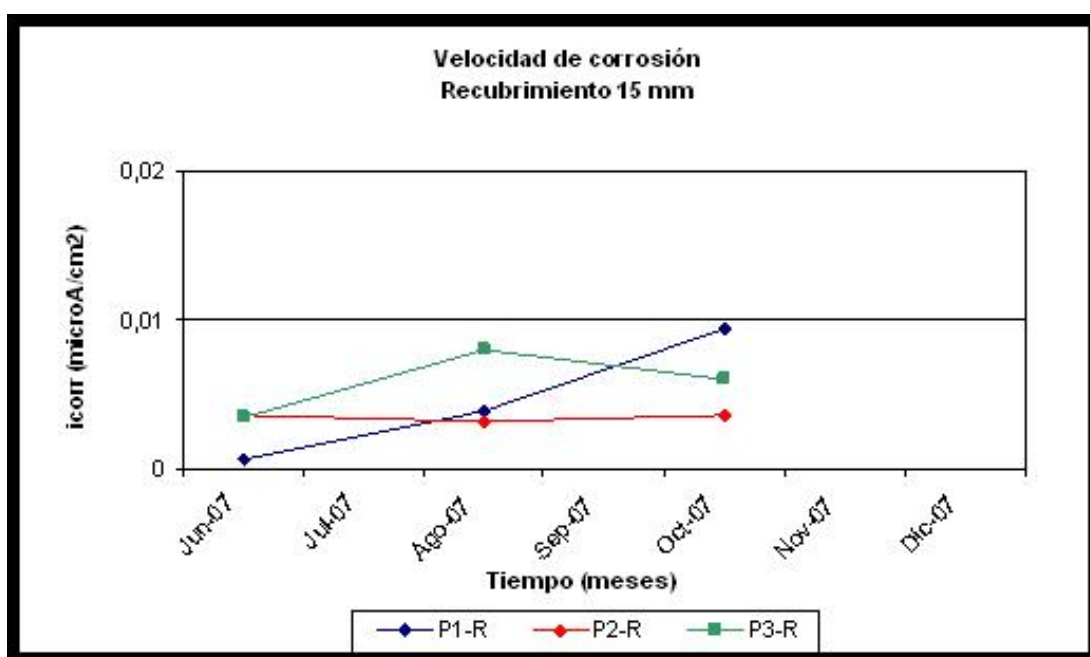
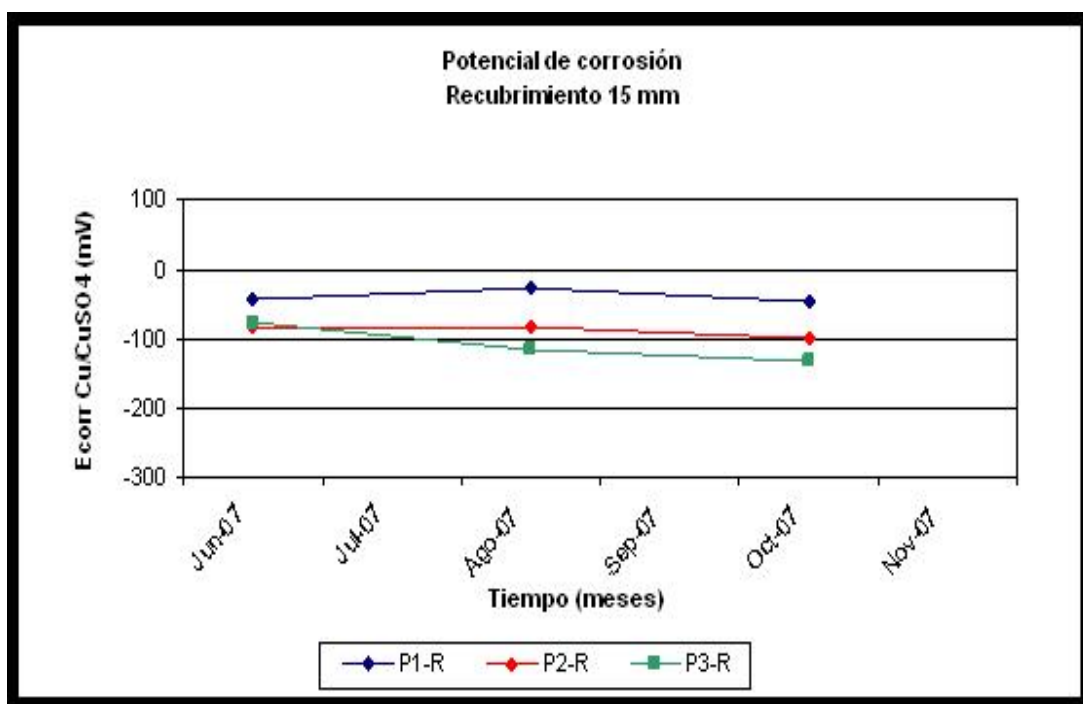


Figura N° 52. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm).

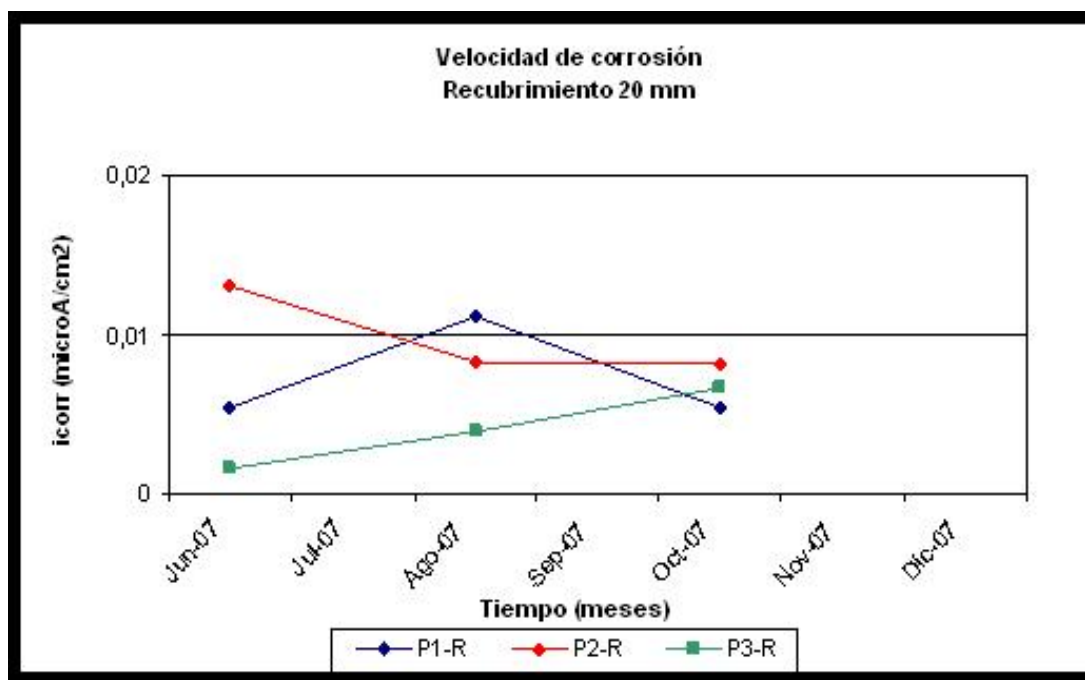
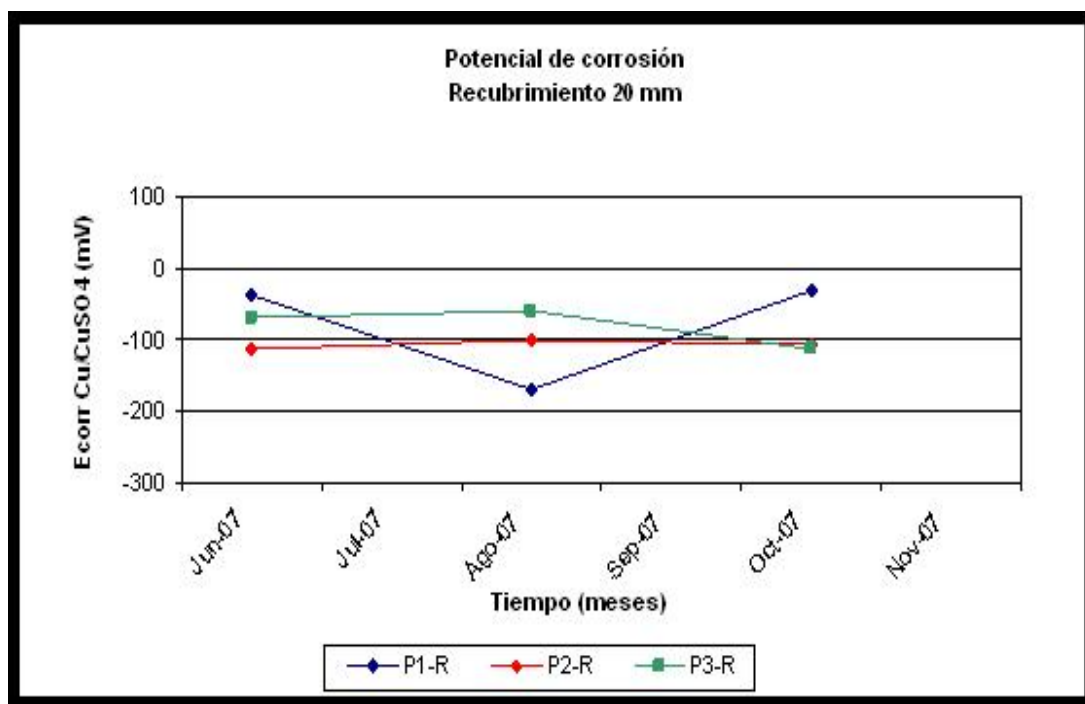


Figura N° 53. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm).

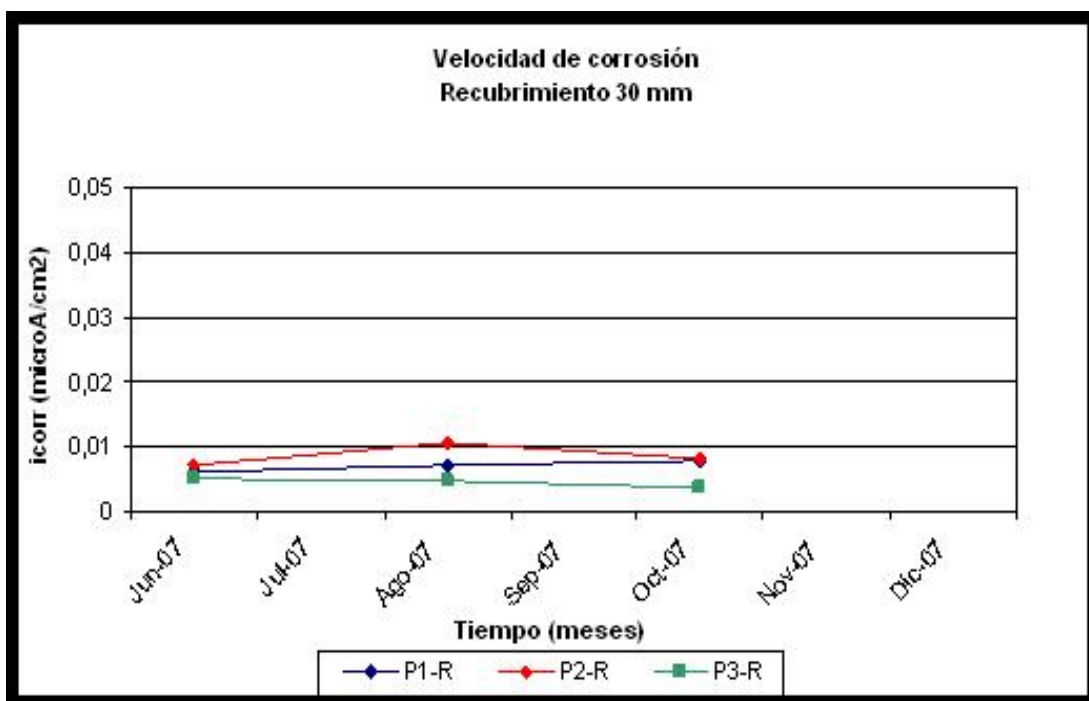
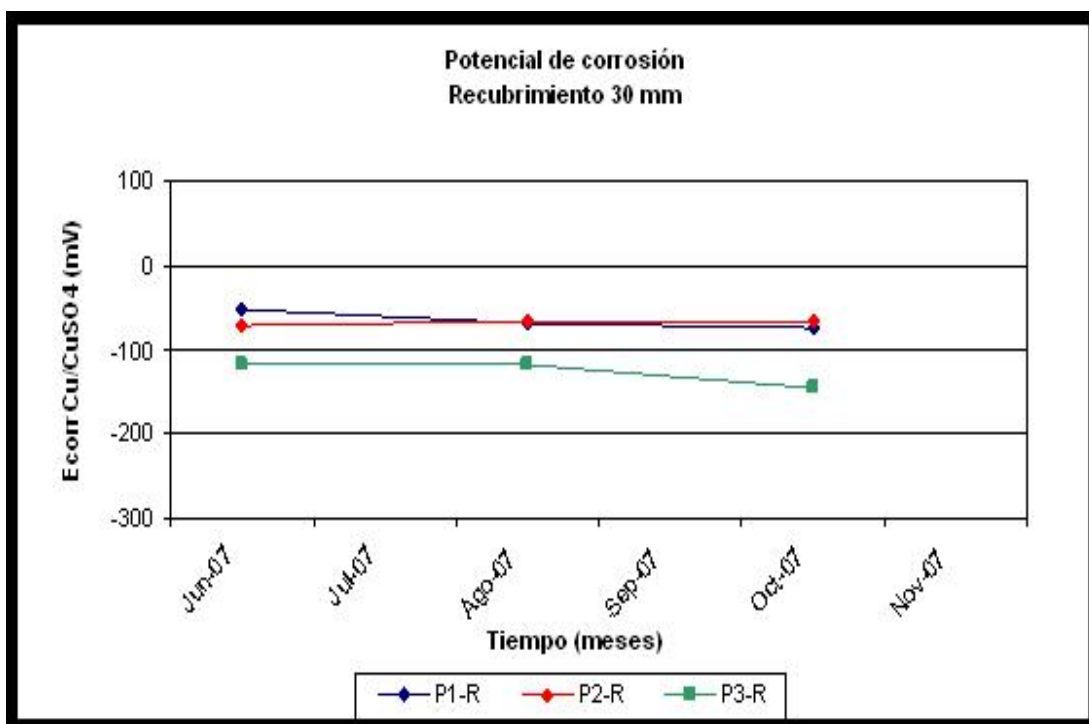


Figura N° 54. Estación Póas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm).

## 2.2 Estación Pavas

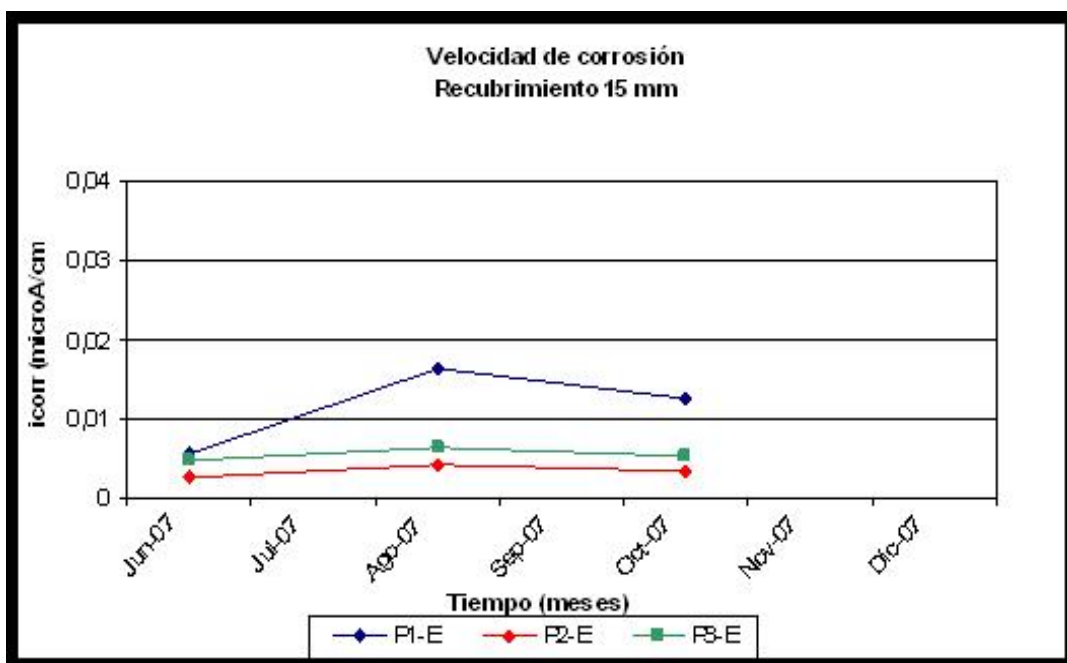
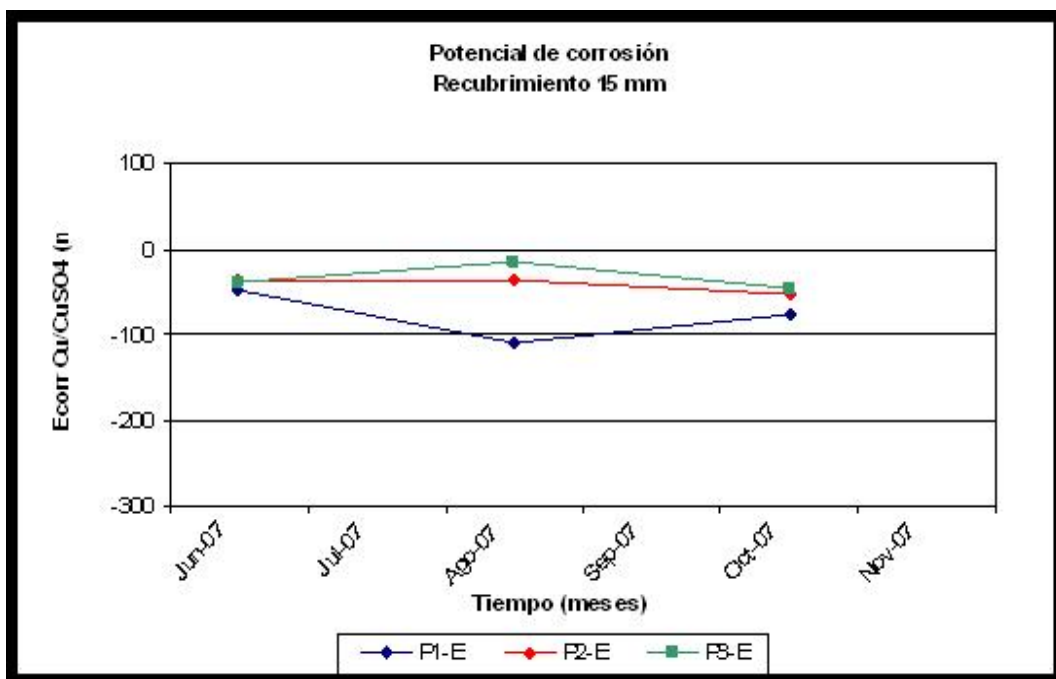


Figura N° 55. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

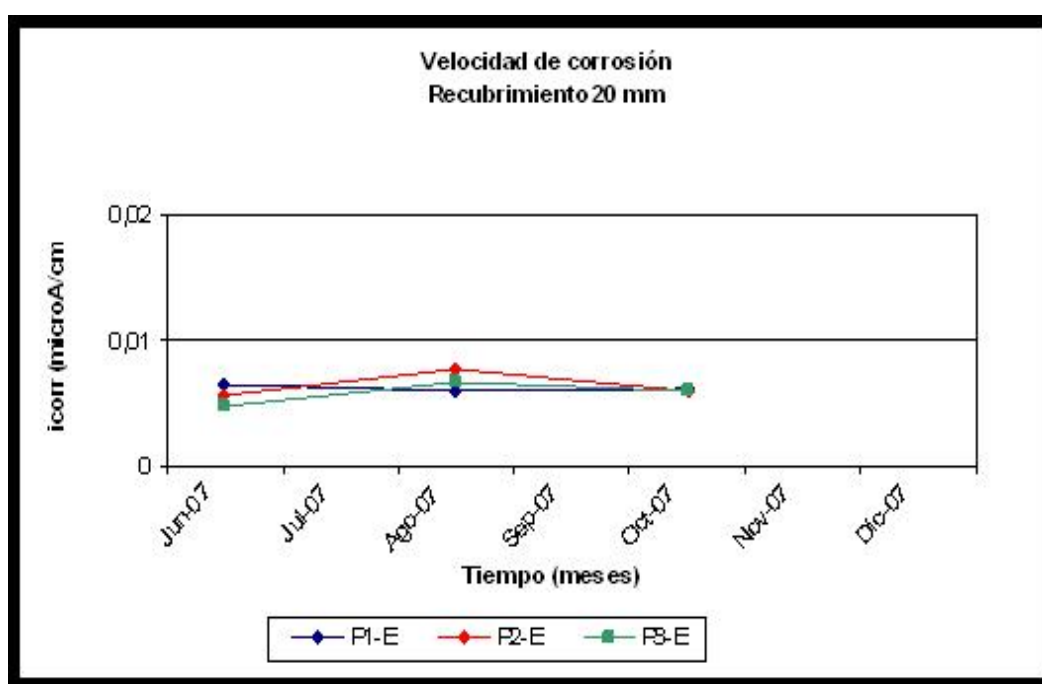
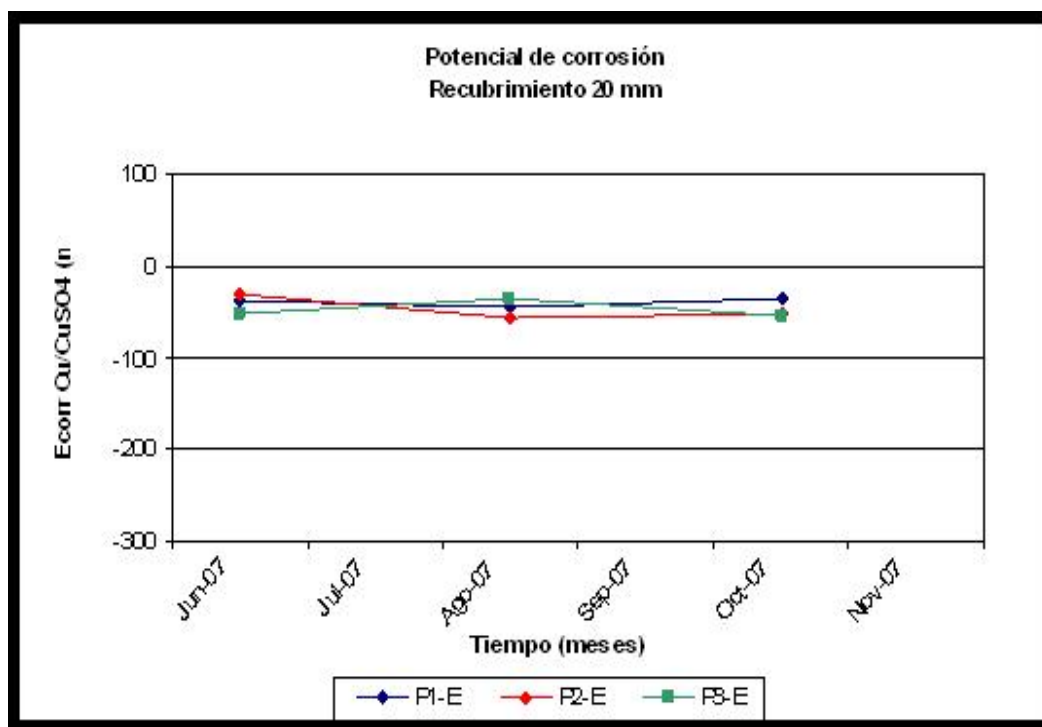


Figura N° 56. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

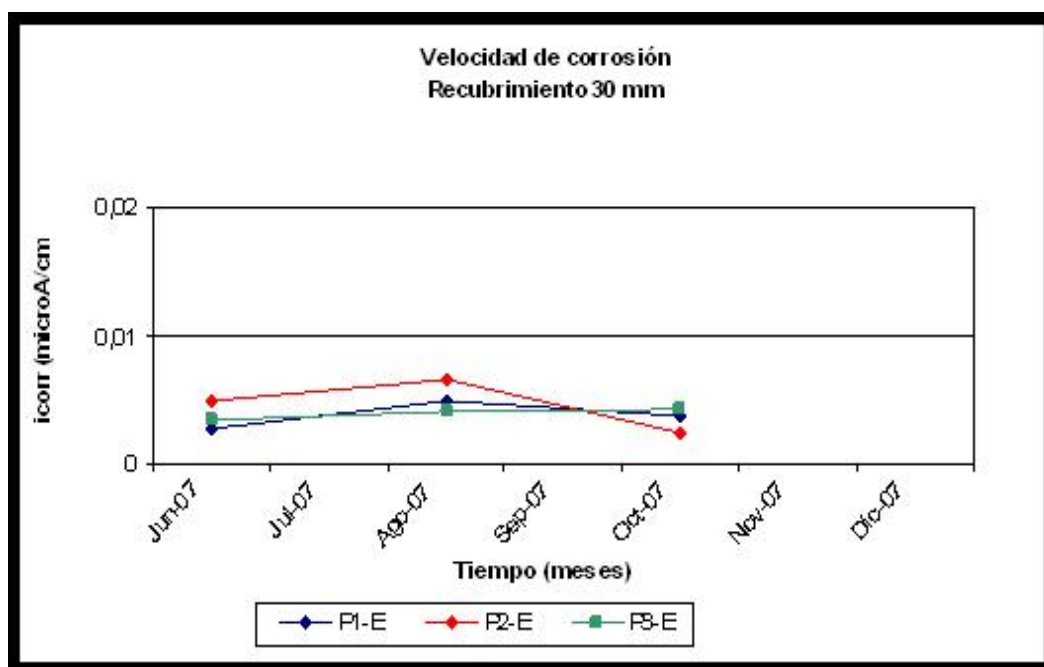
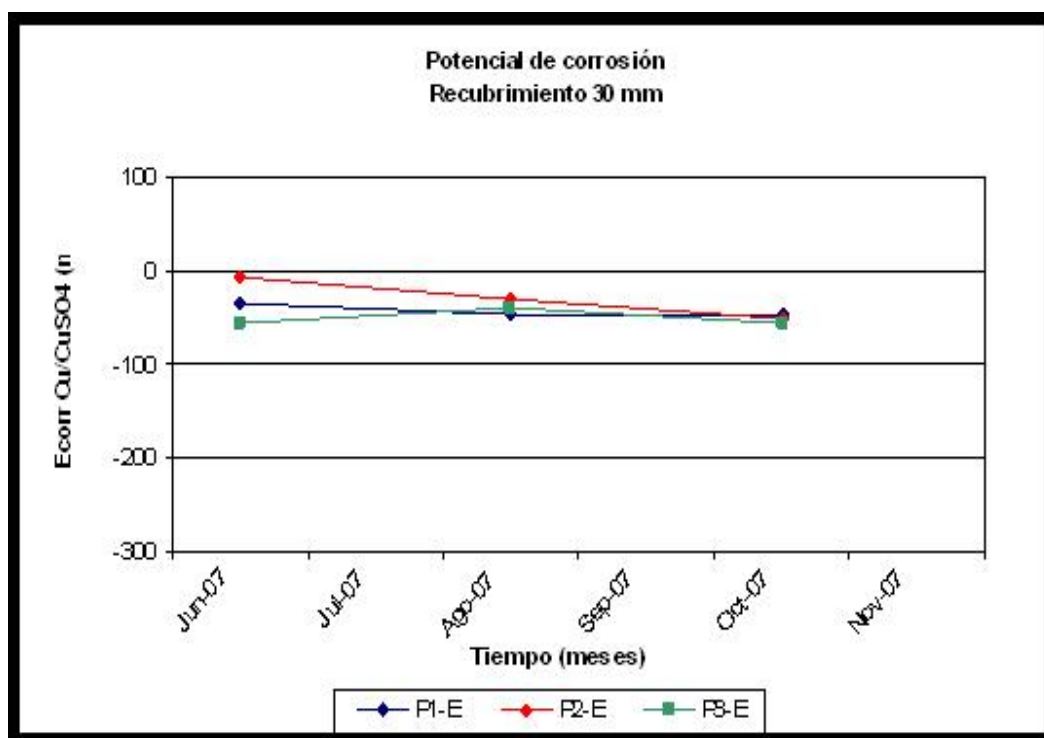


Figura N° 57. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

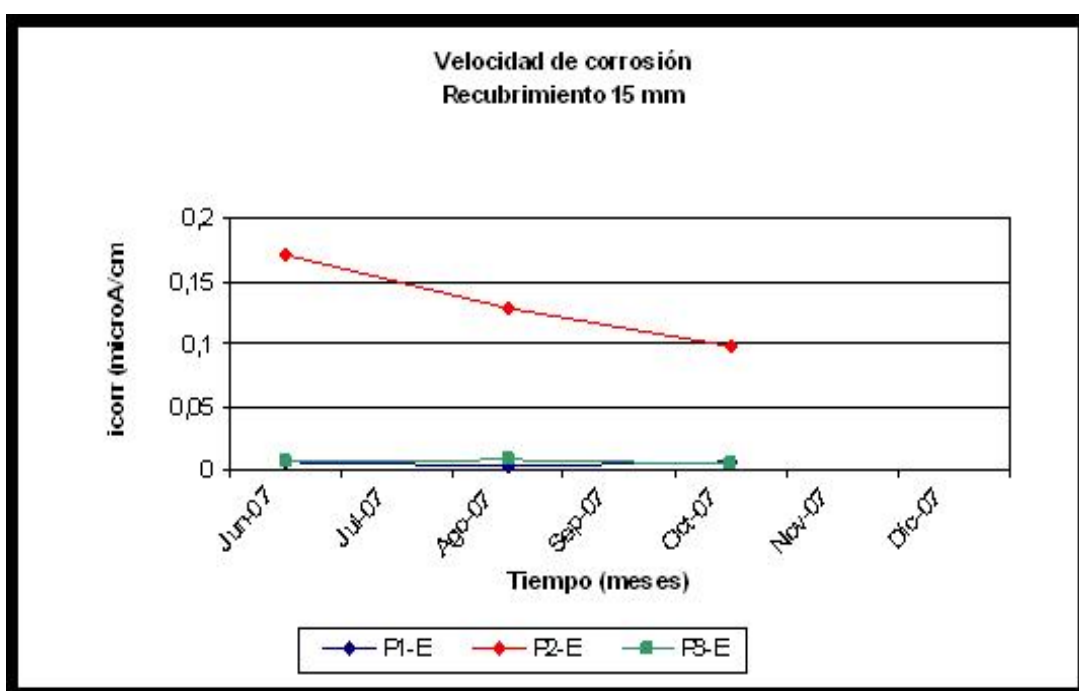
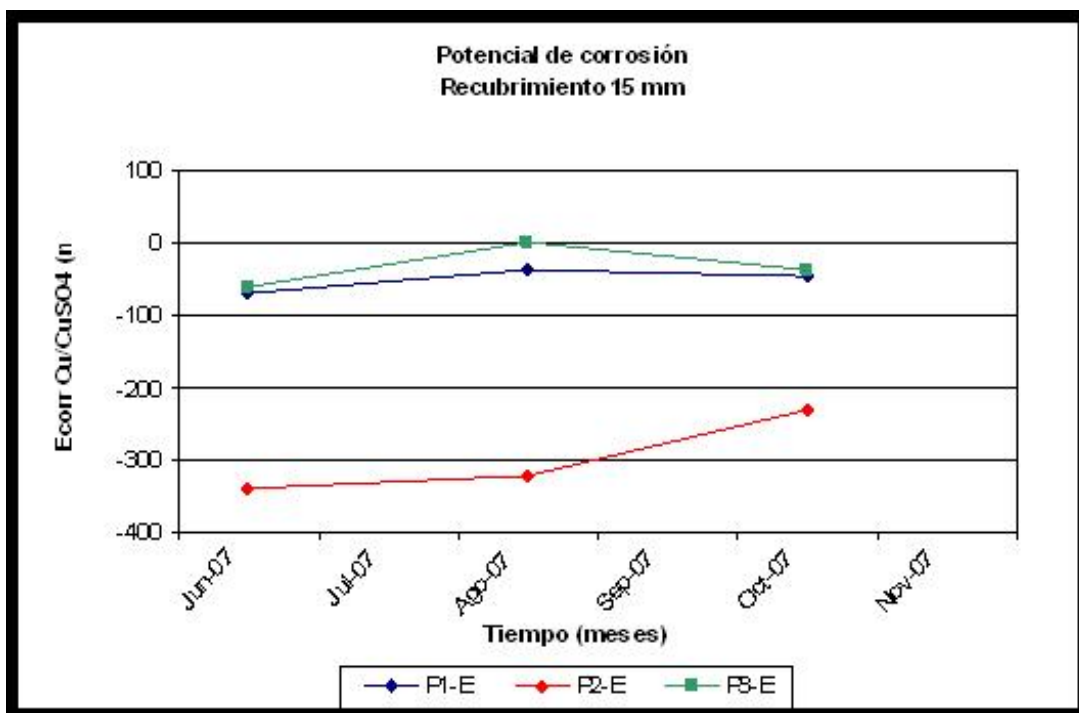


Figura N° 58. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

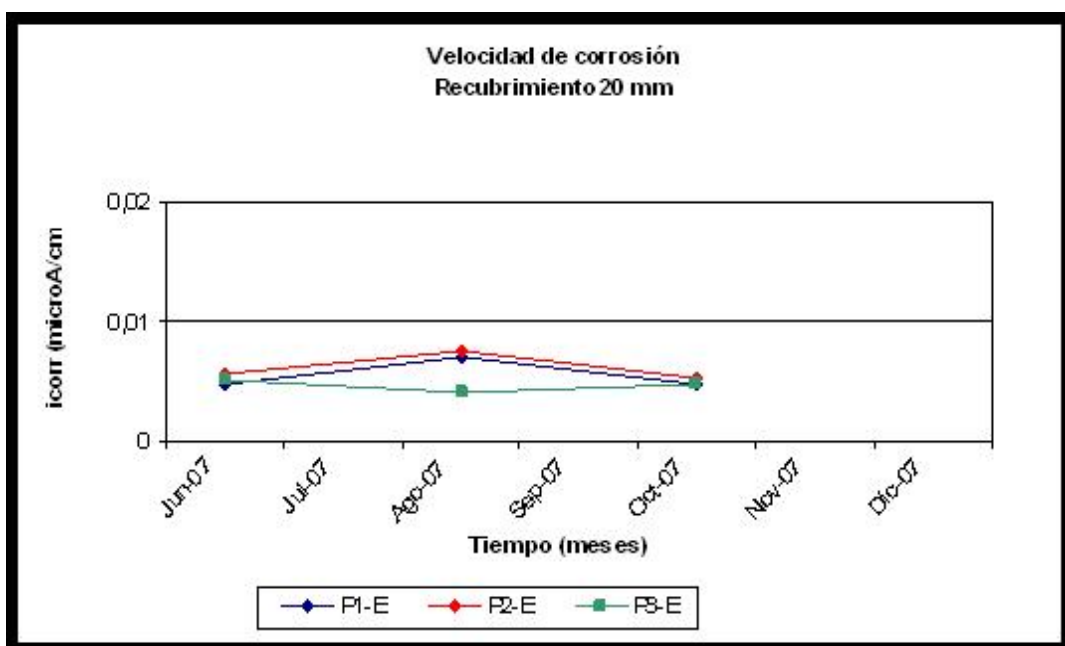
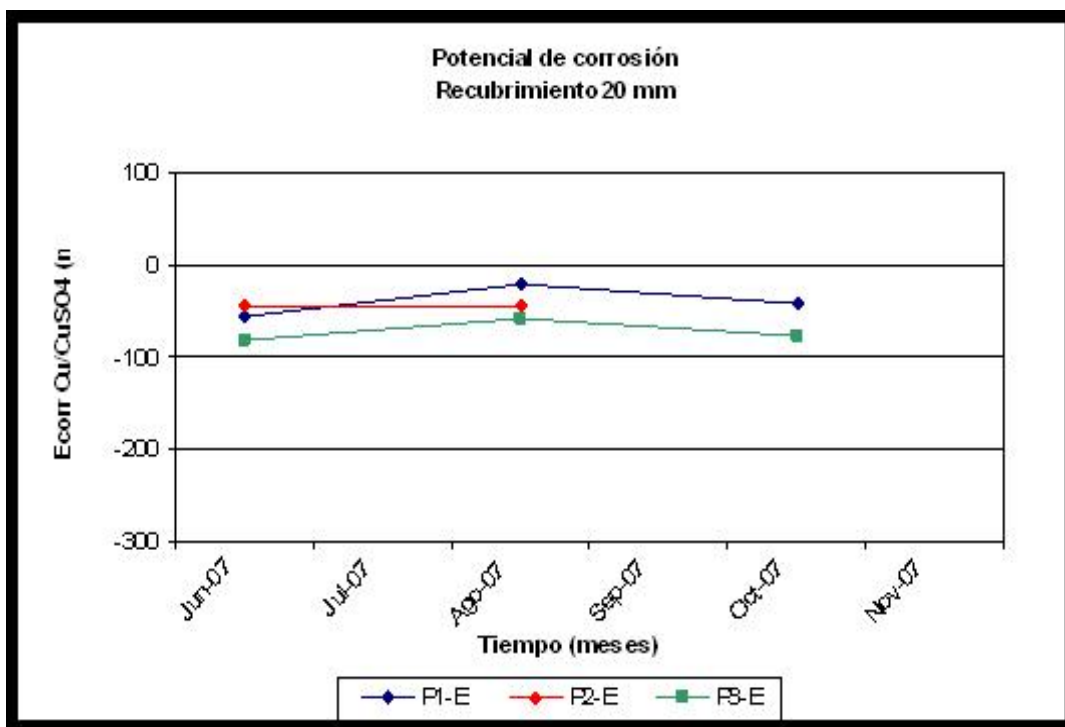


Figura N° 59. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)



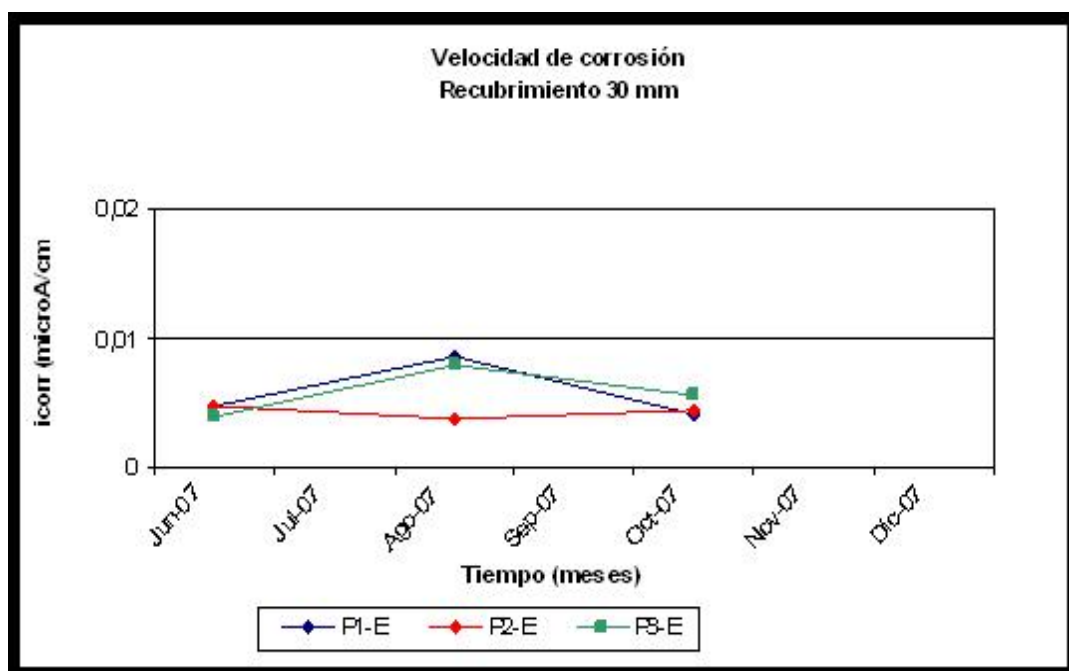
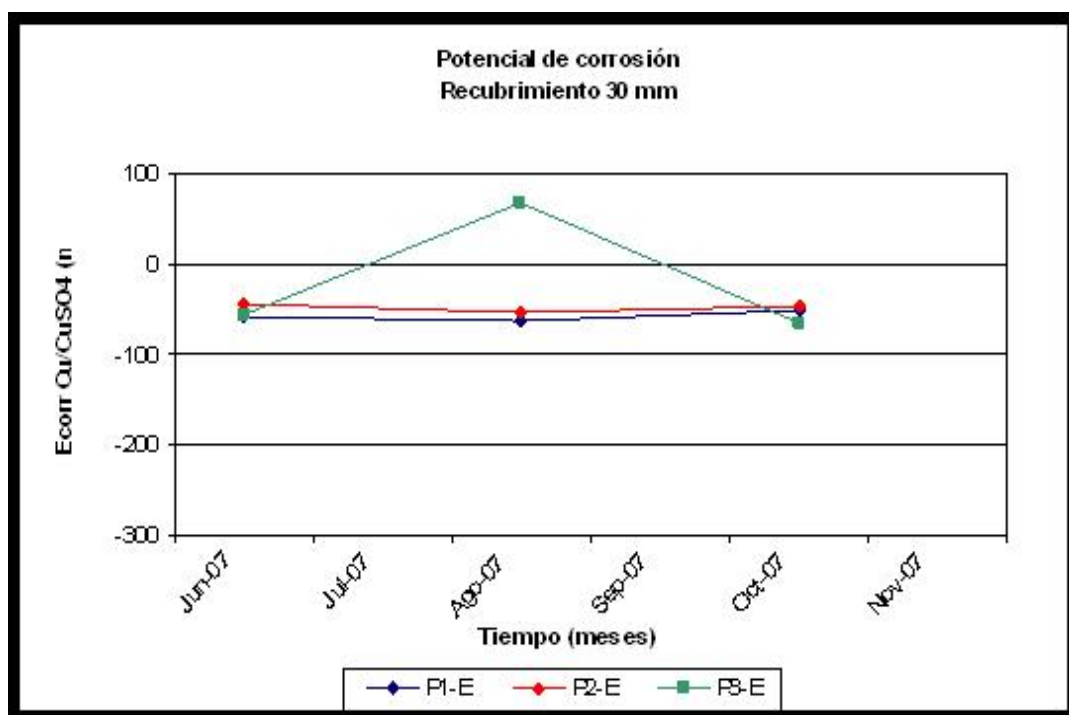


Figura N° 60. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

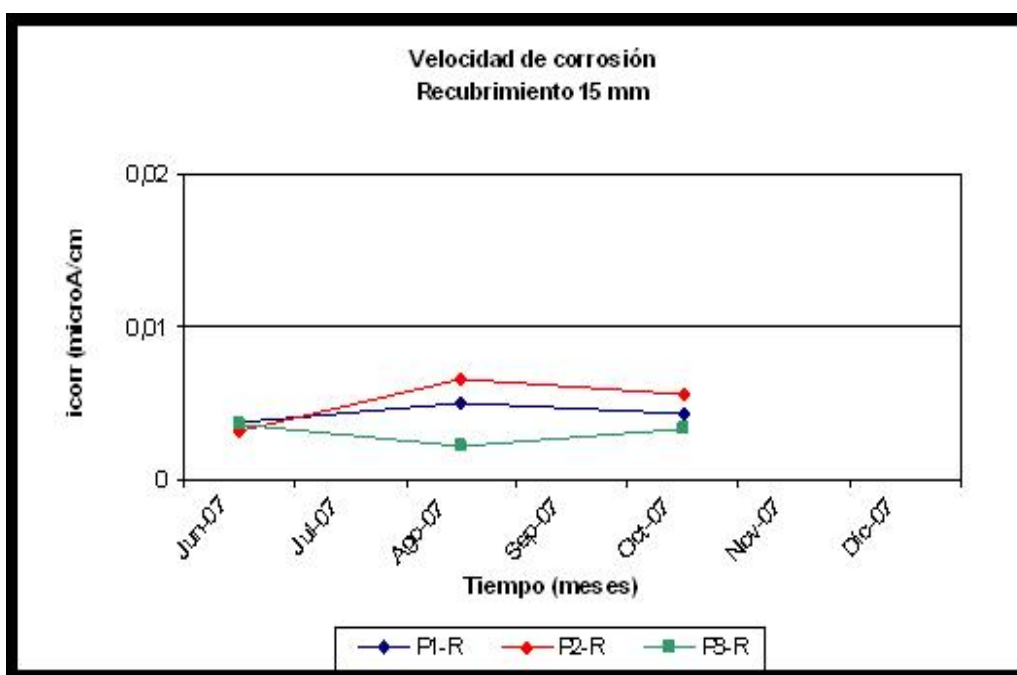
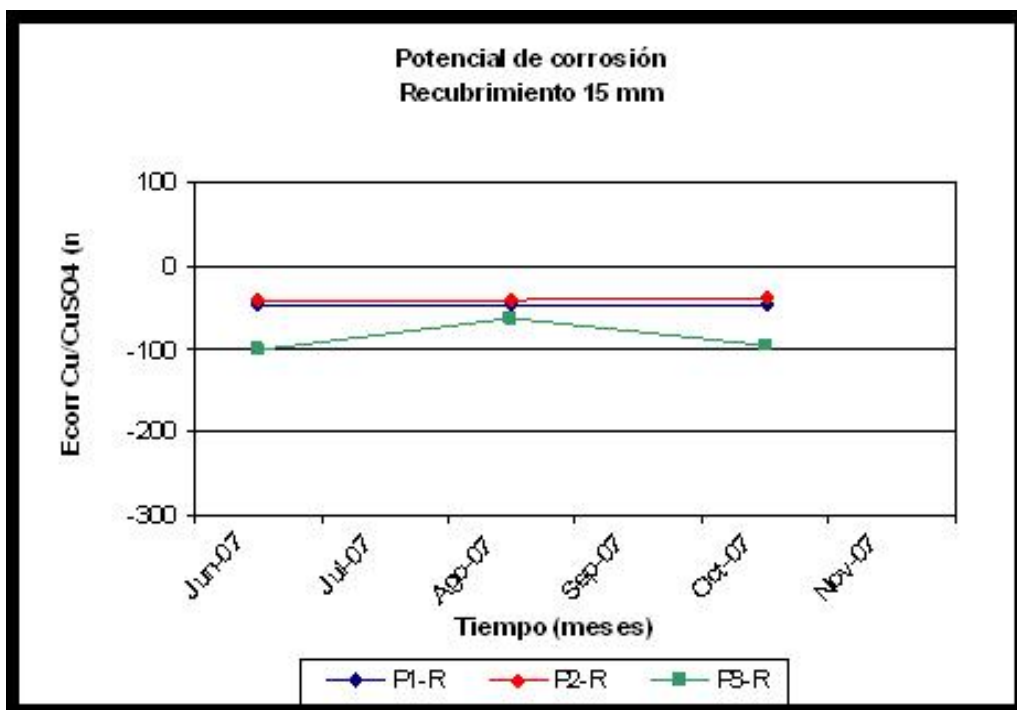


Figura N° 61. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

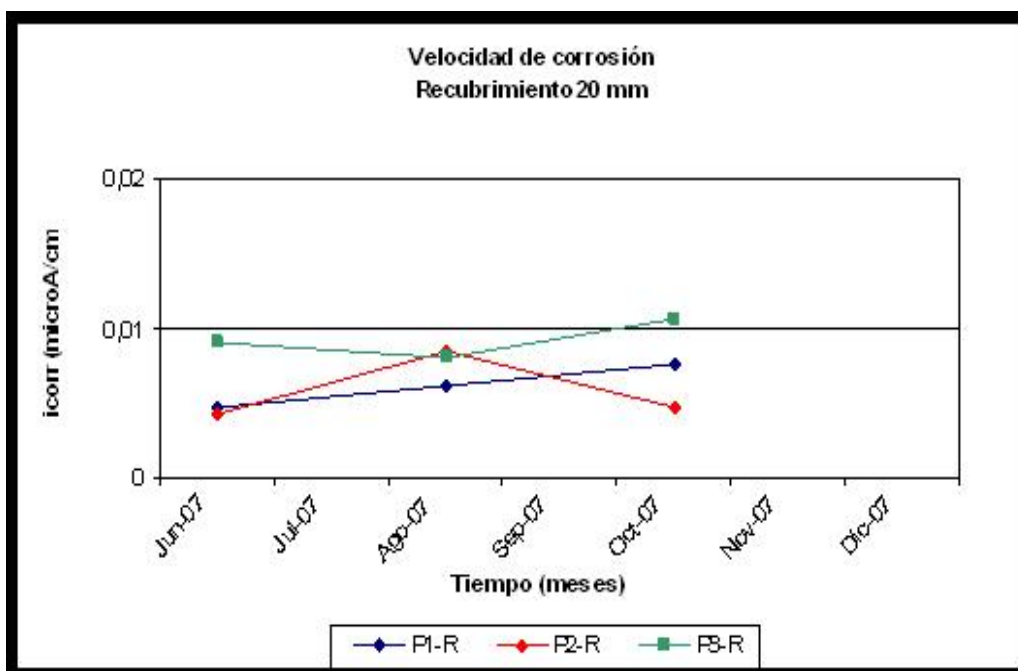
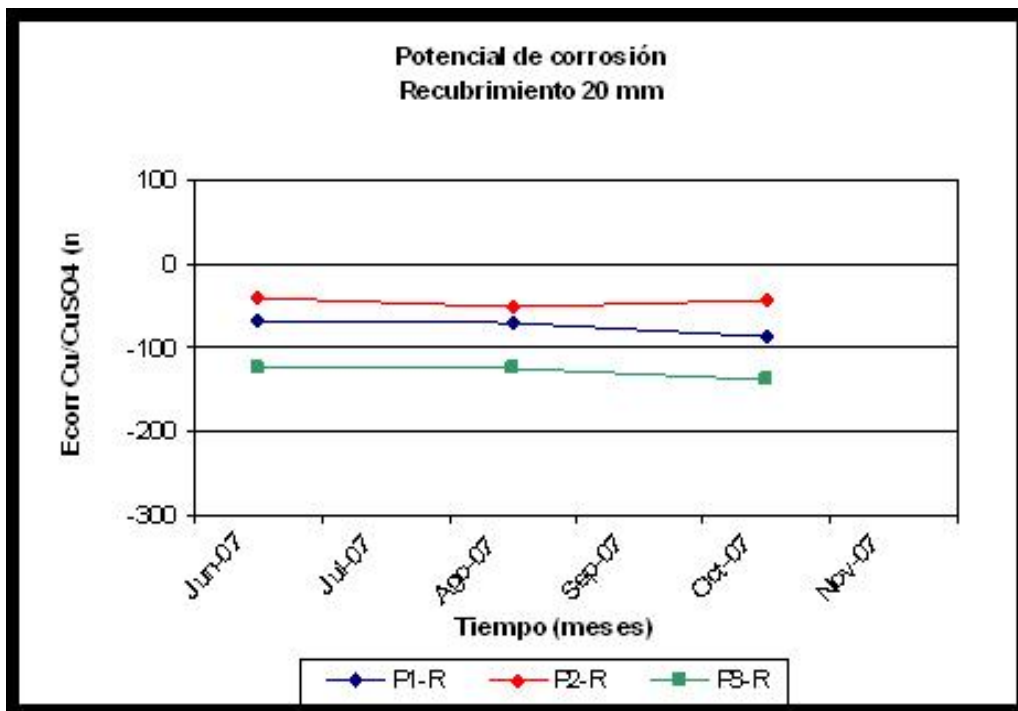


Figura N° 62. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

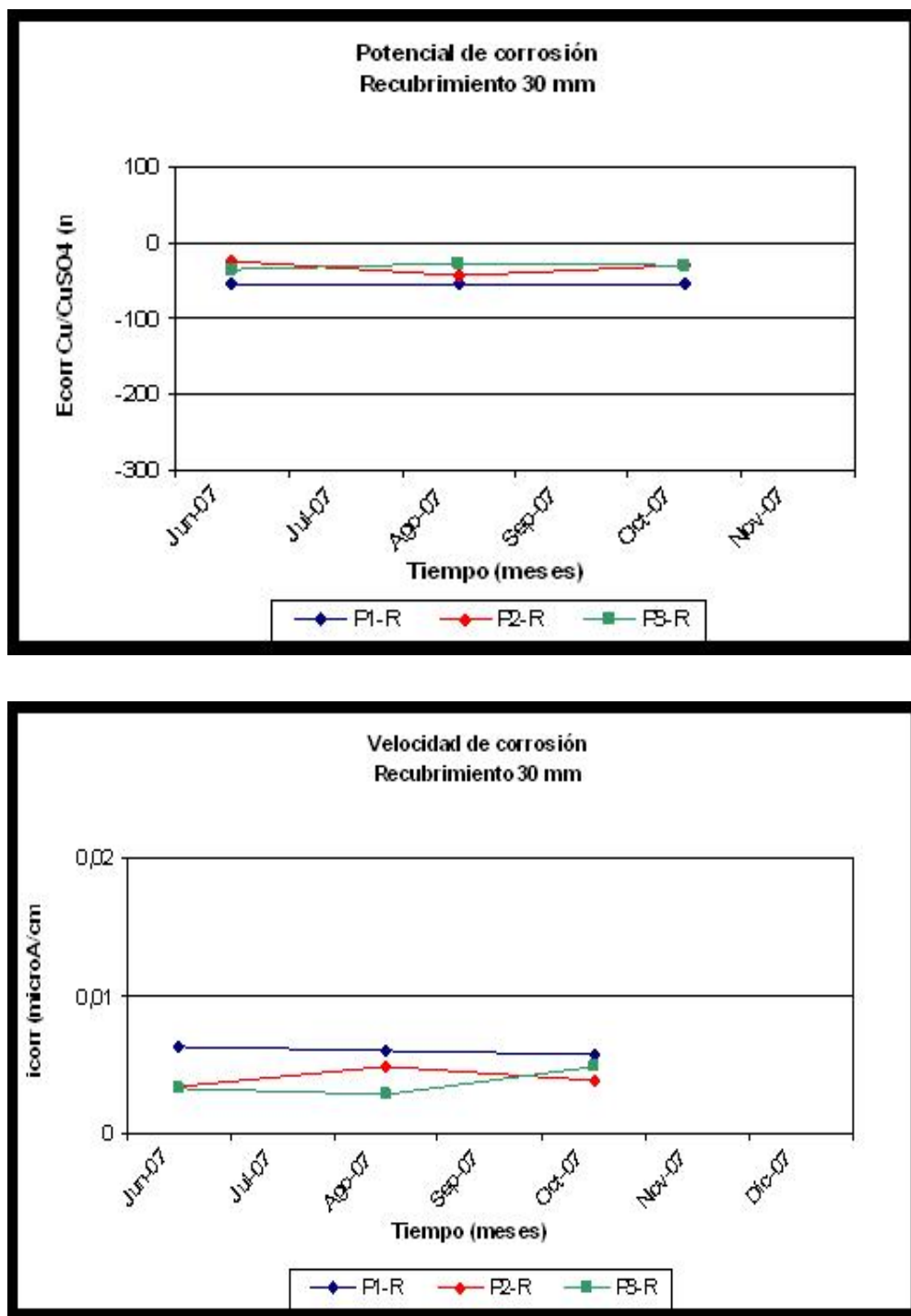


Figura N° 63. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

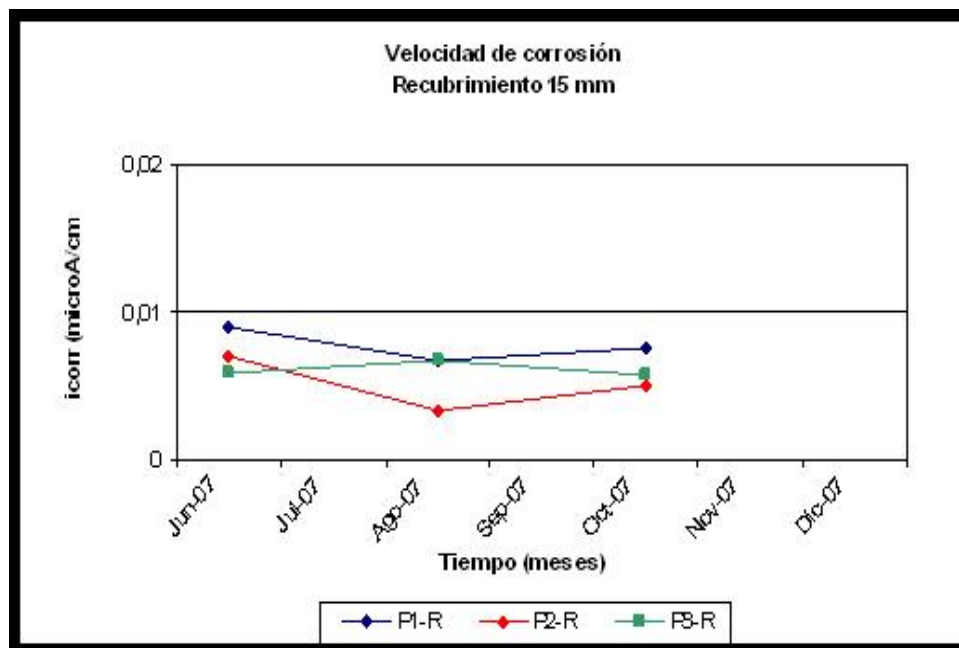
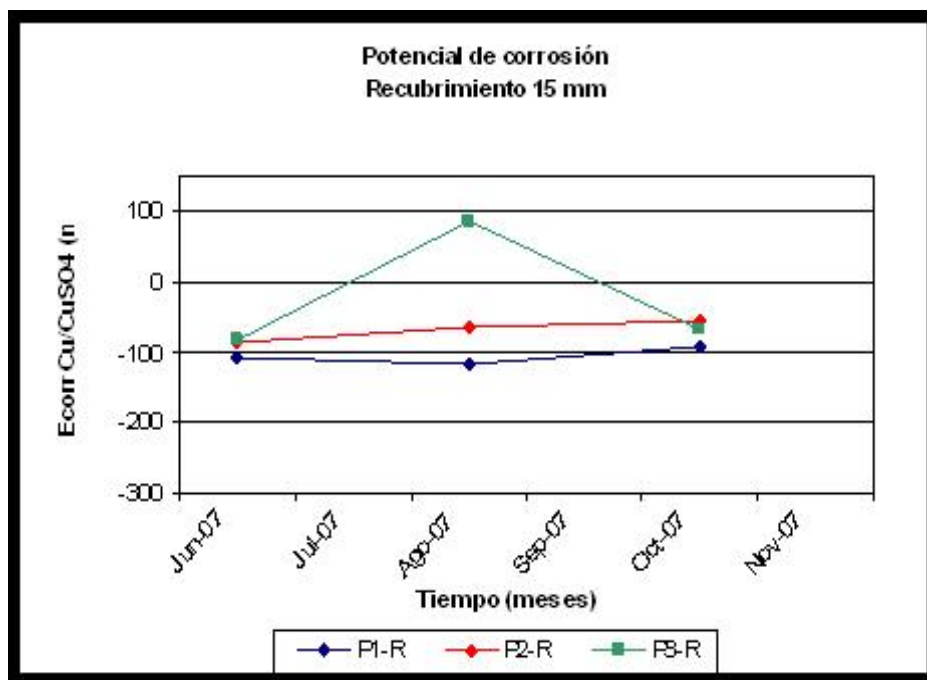


Figura N° 64. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

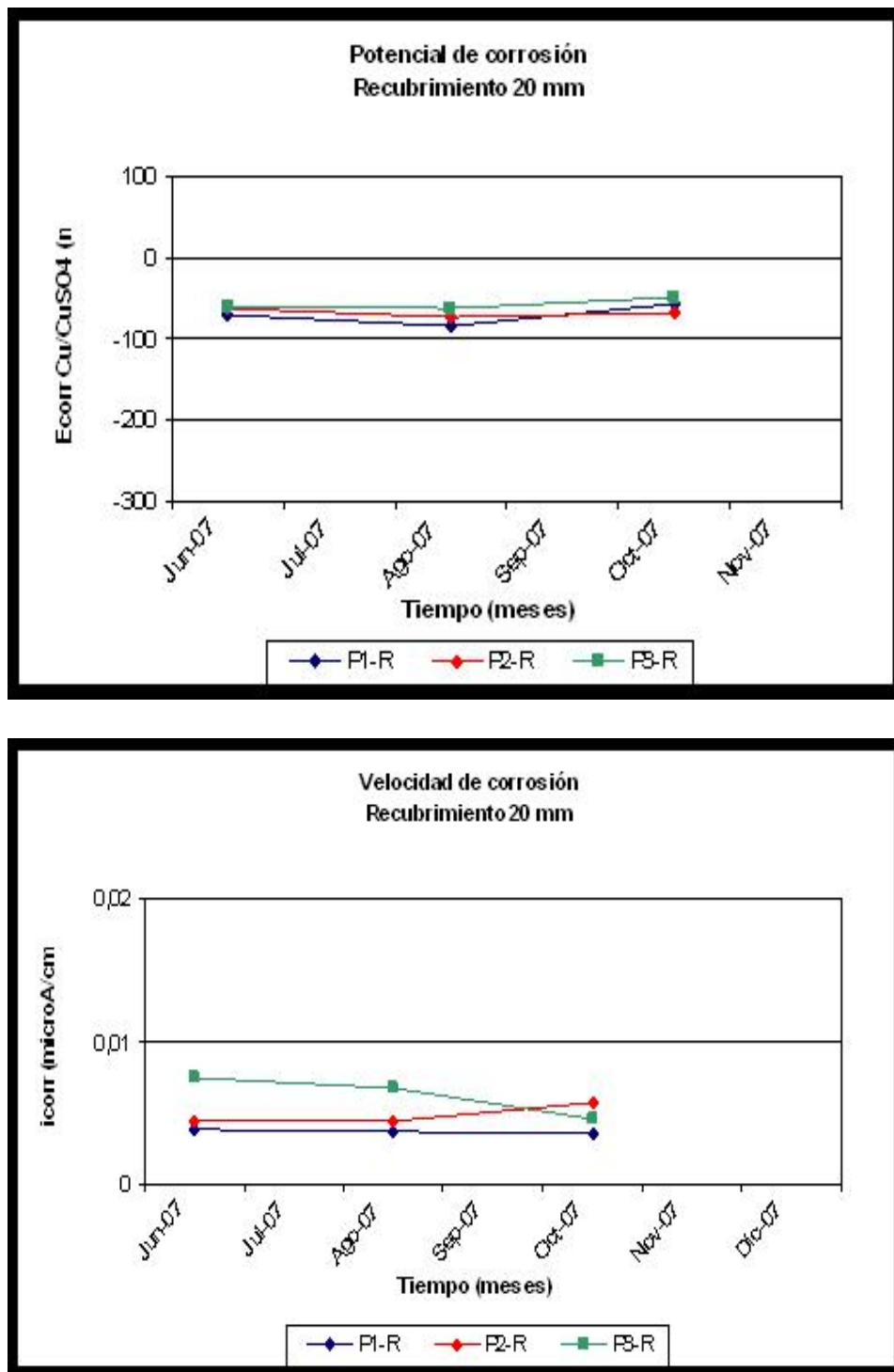


Figura N° 65. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

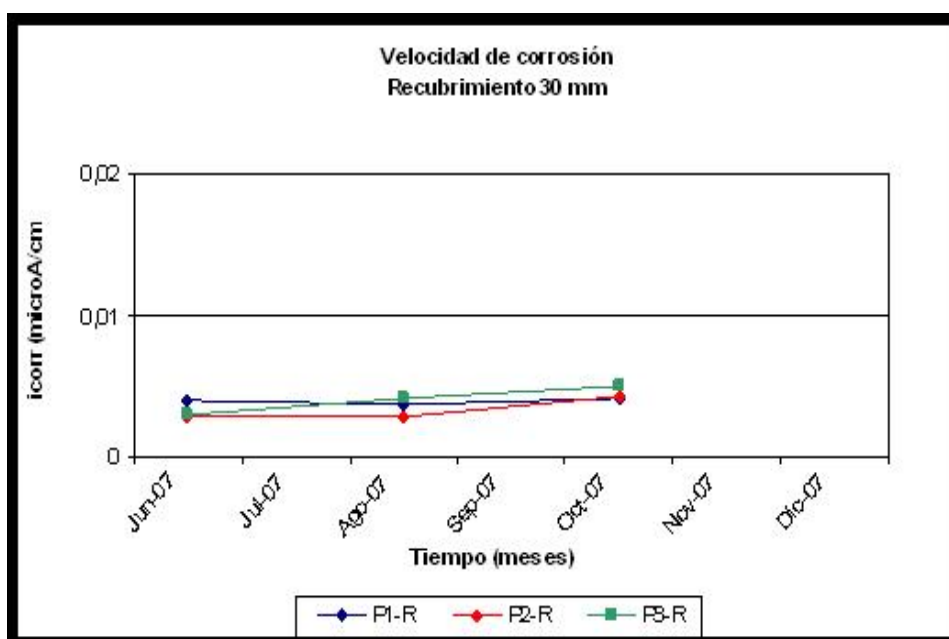
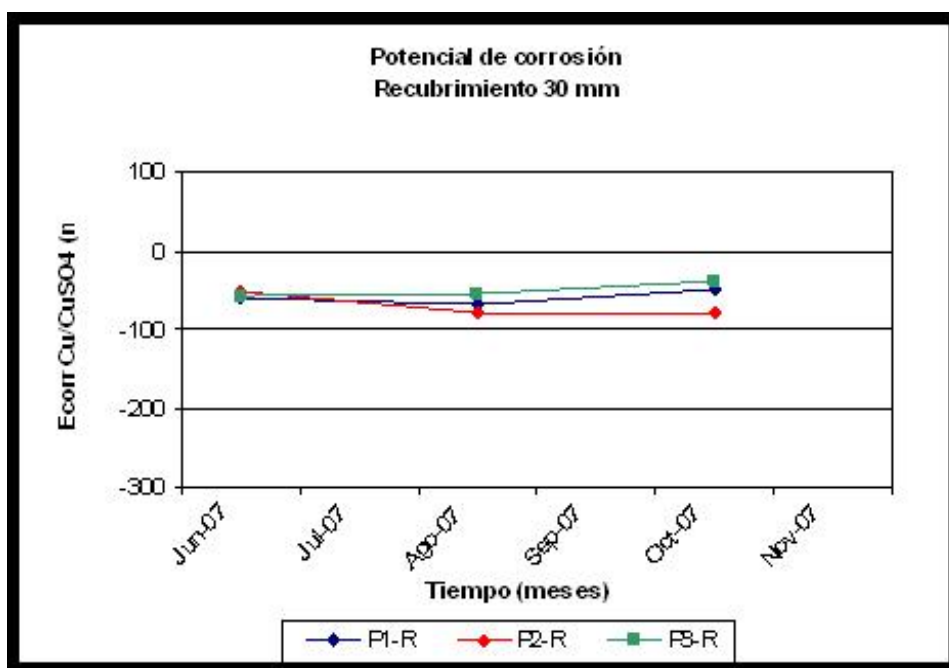


Figura N° 66. Estación Pavas. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

### 2.3 Estación San José

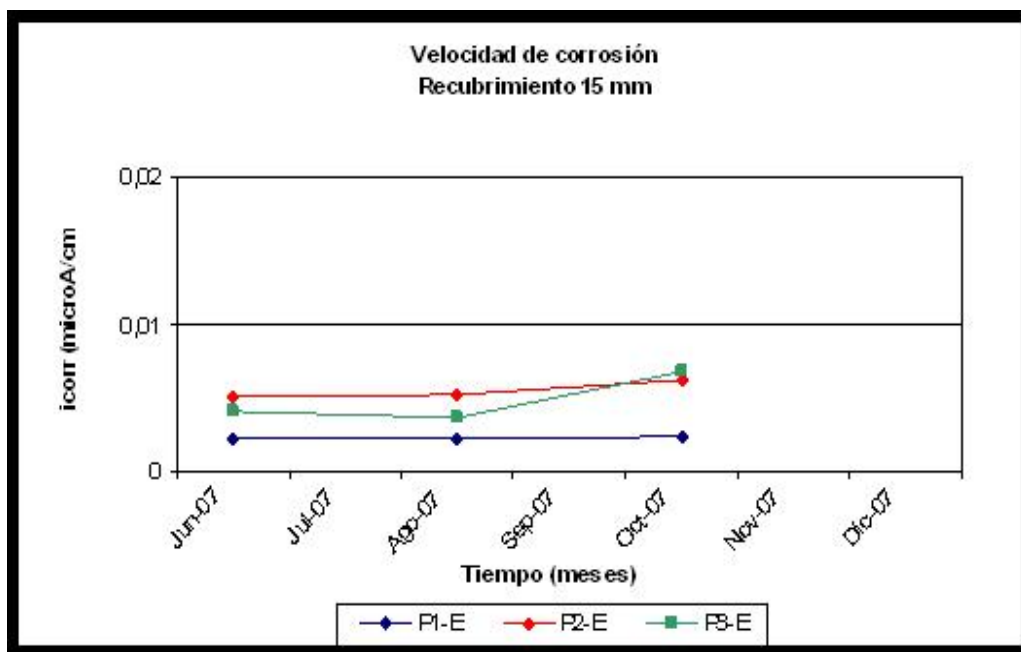
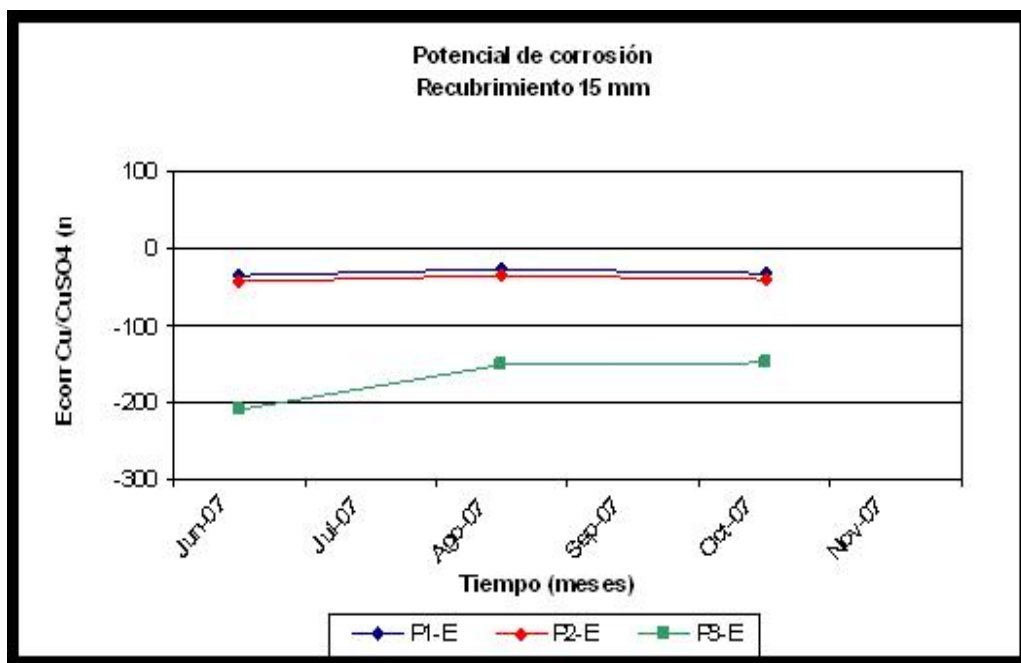


Figura N° 67. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)



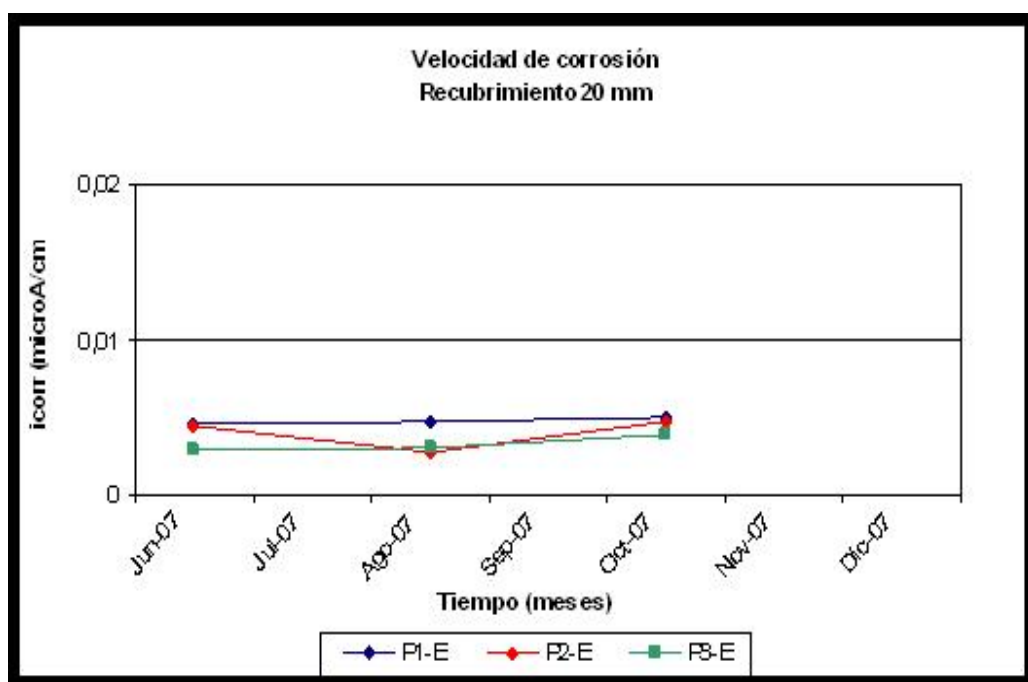
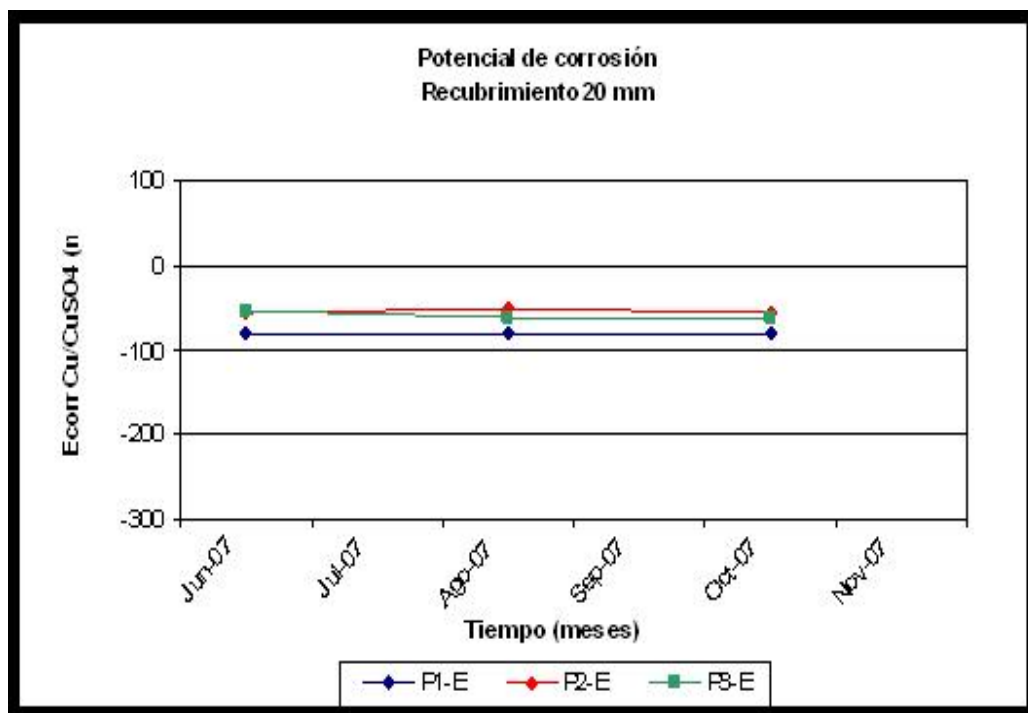


Figura N° 68. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

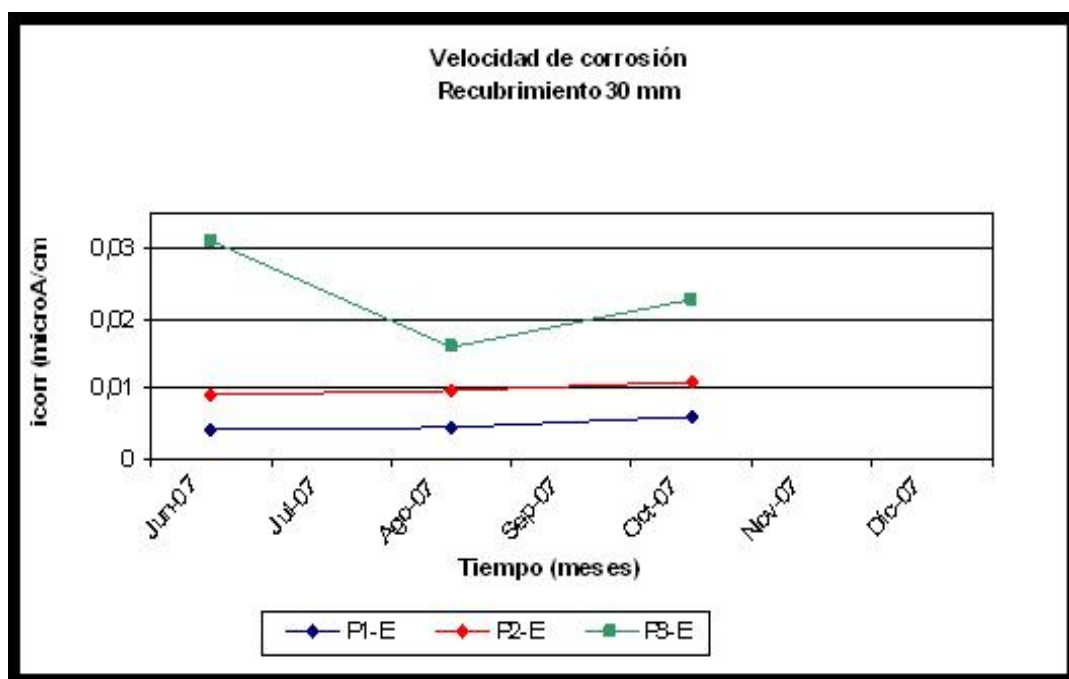
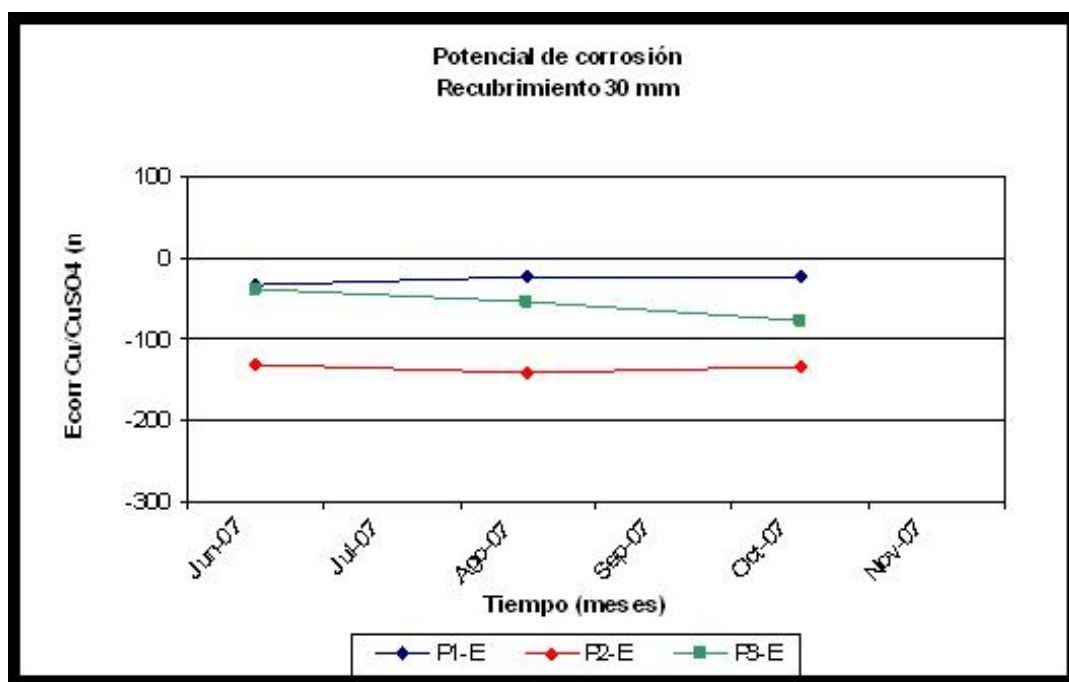


Figura N° 69. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

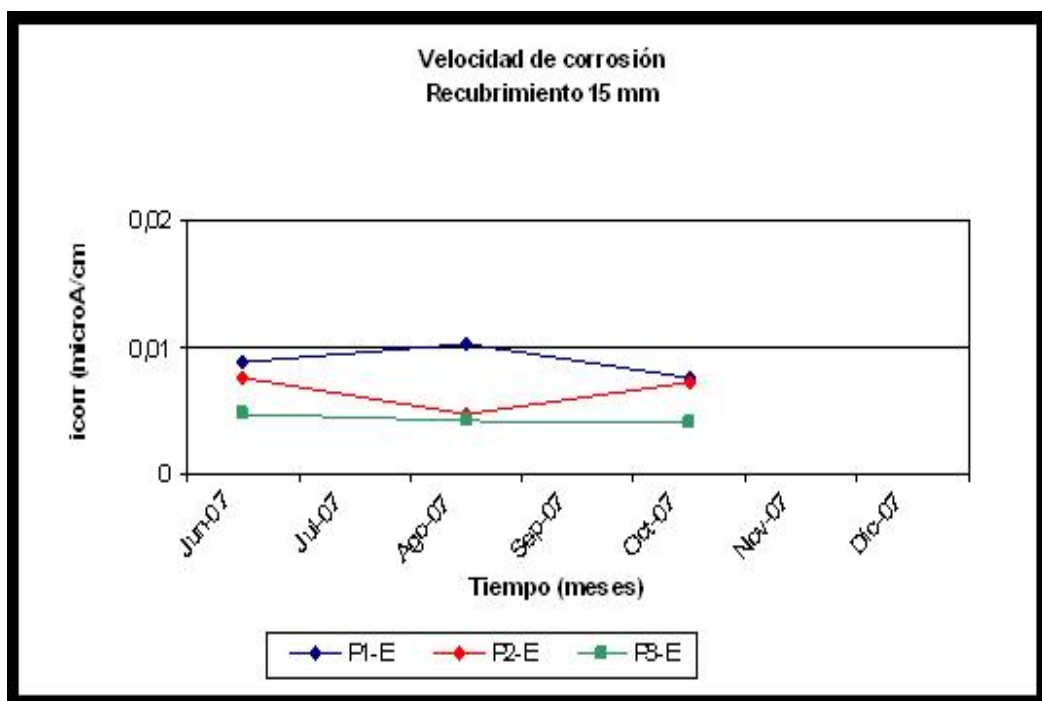
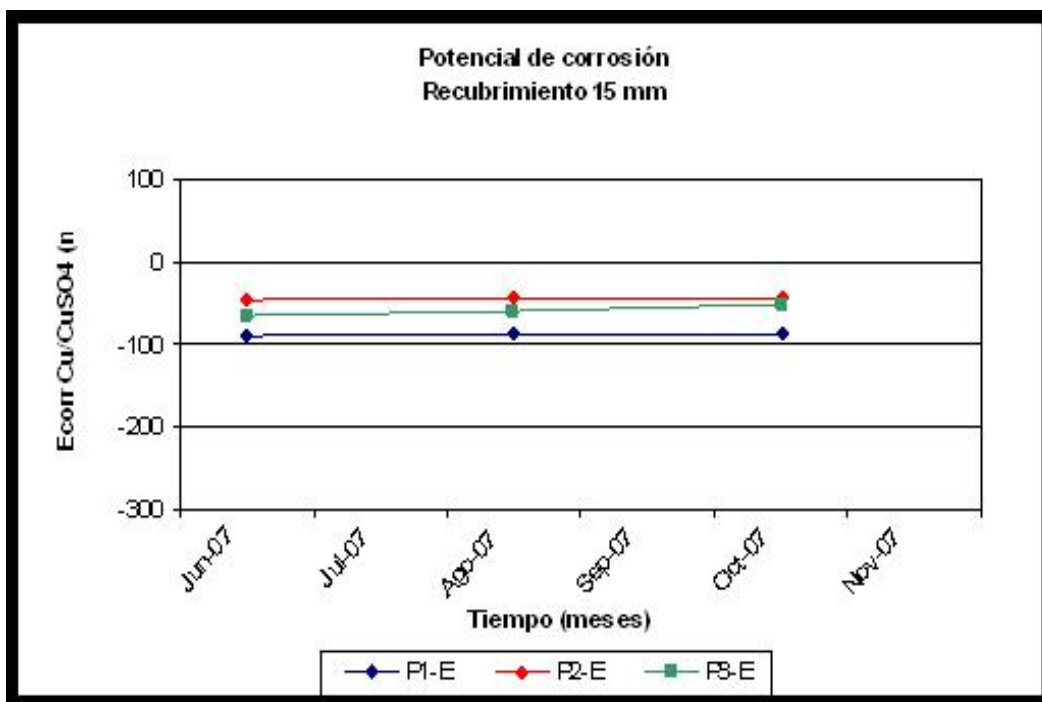


Figura N° 70. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

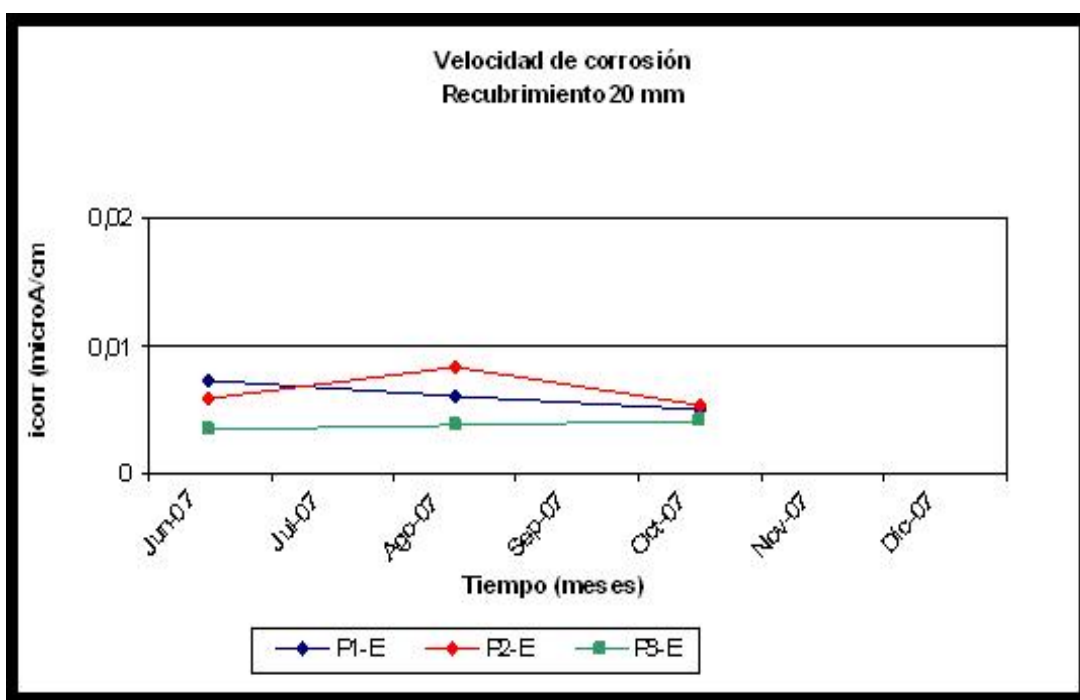
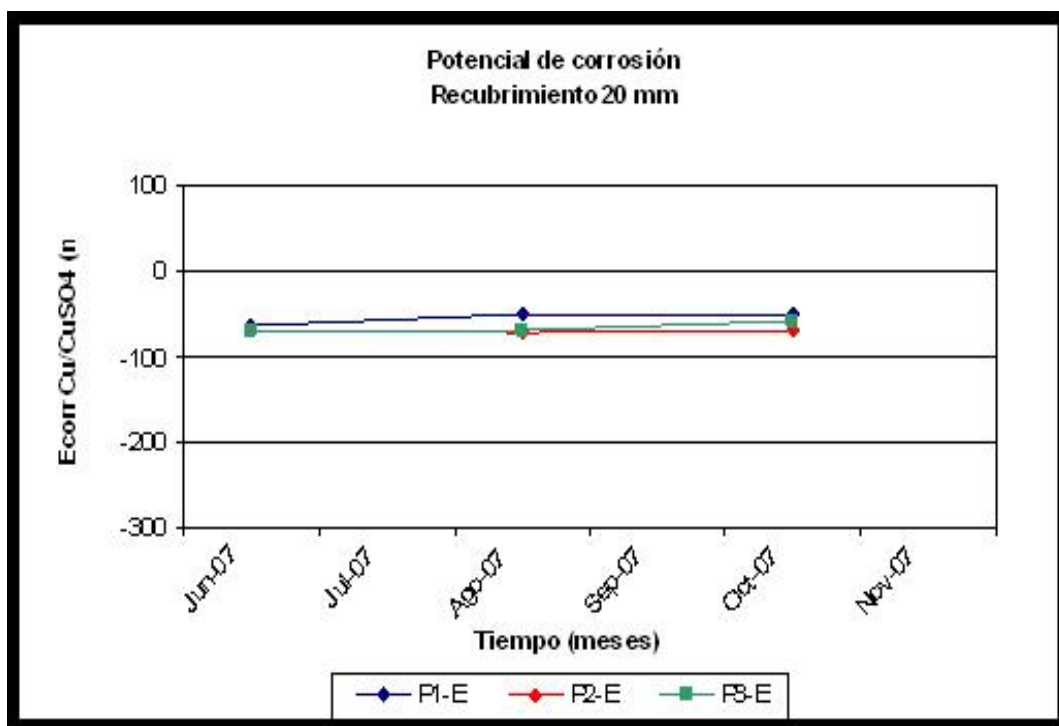


Figura N° 71. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

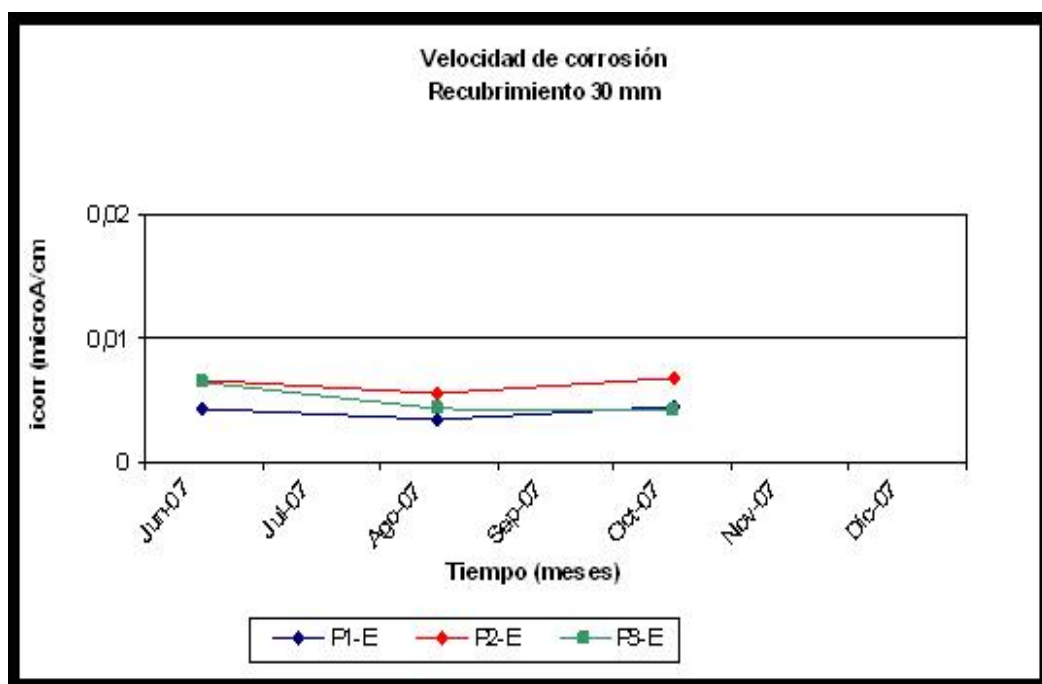
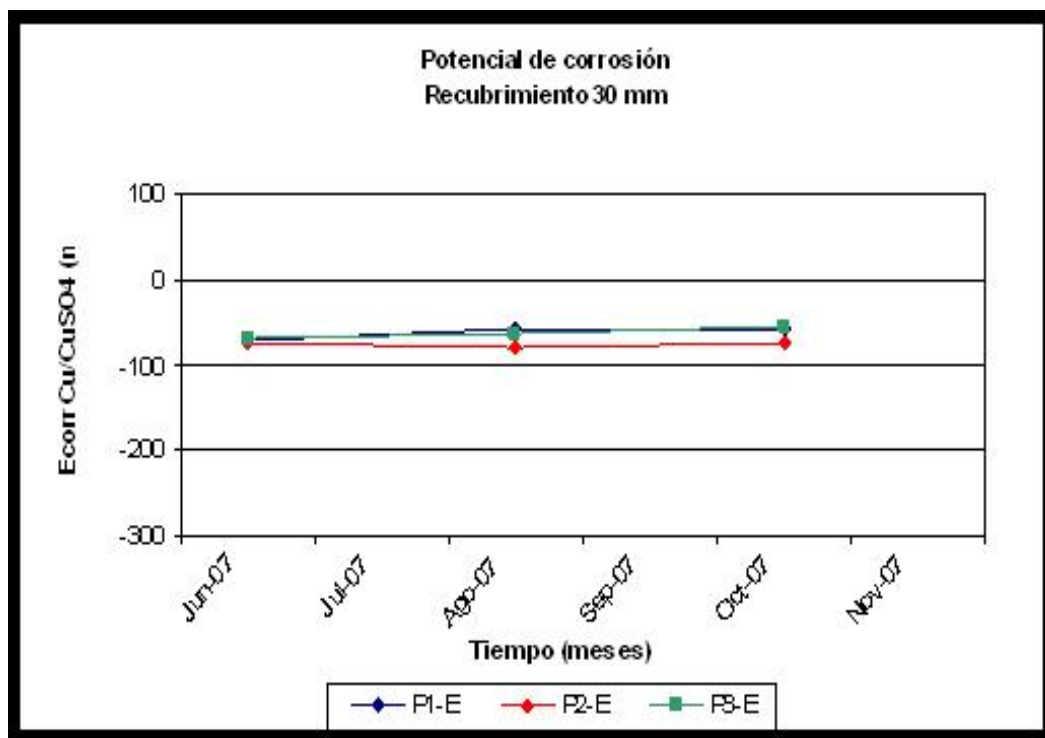


Figura N° 72. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

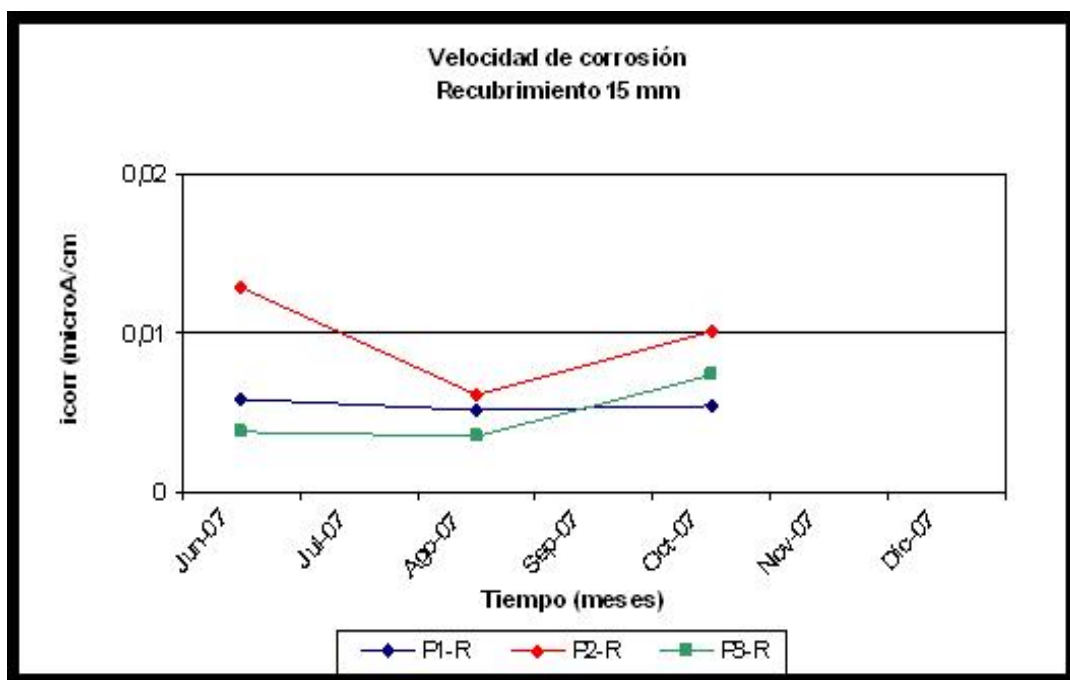
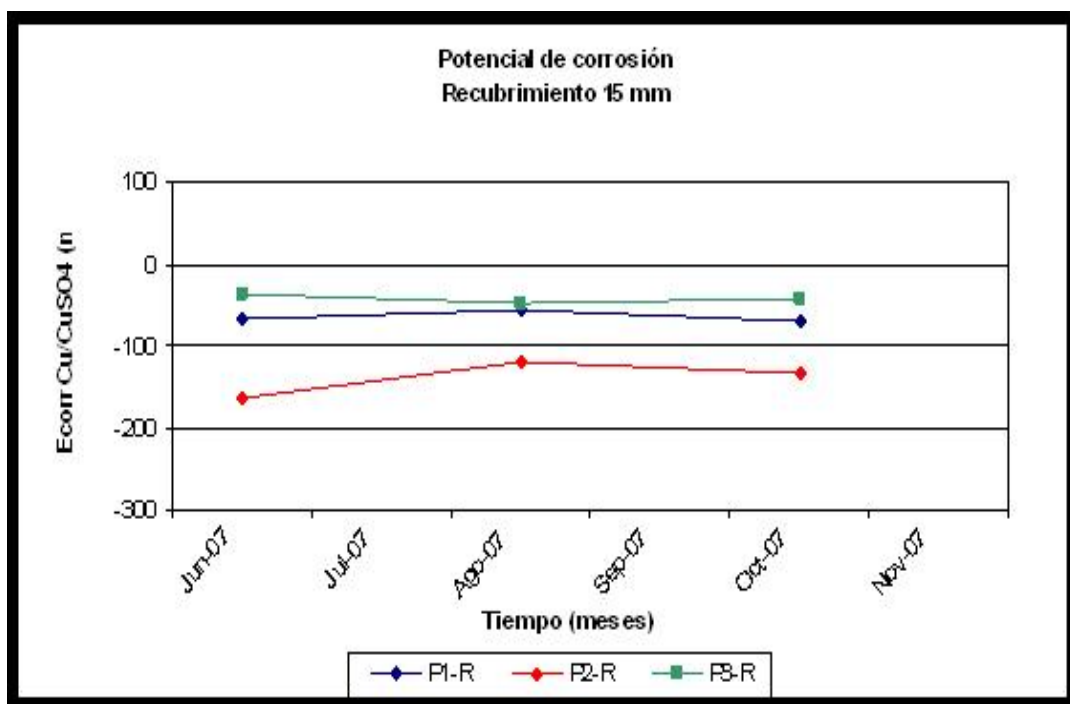


Figura N° 73. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

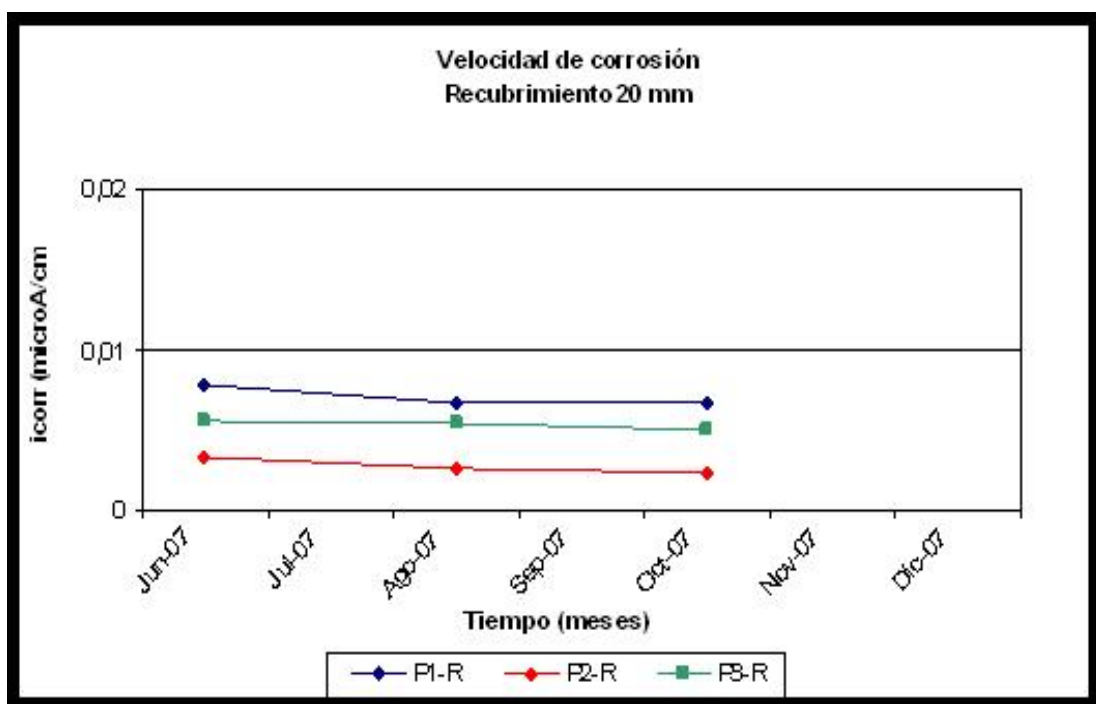
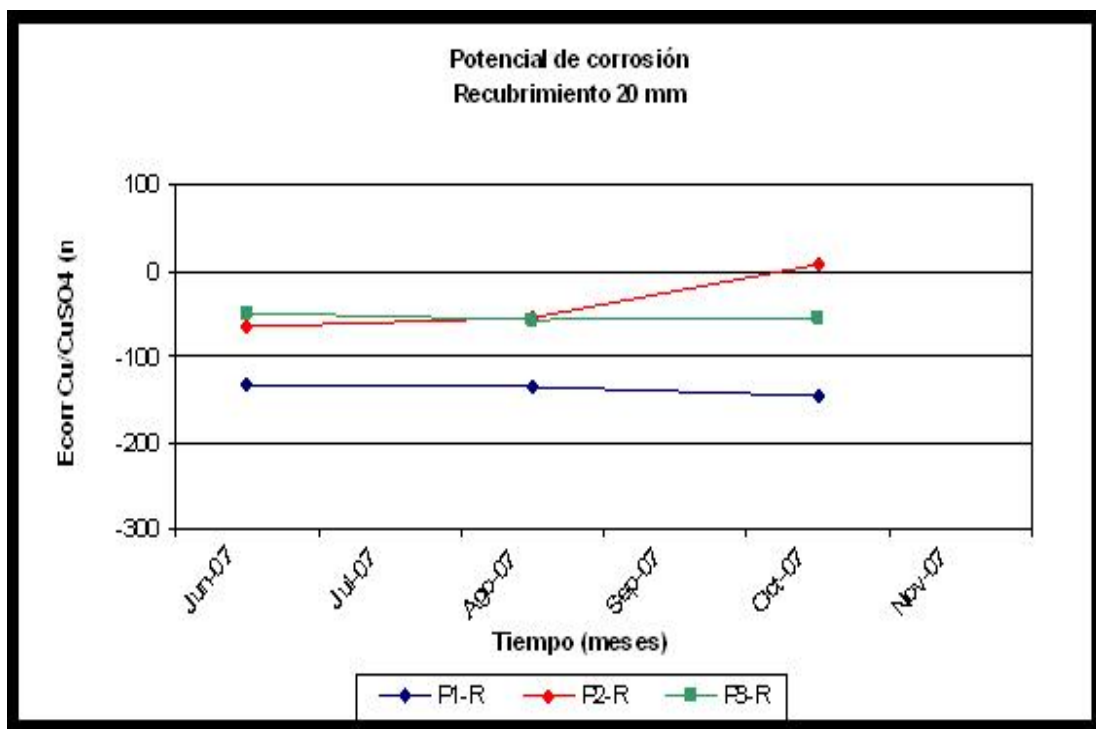


Figura N° 74. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

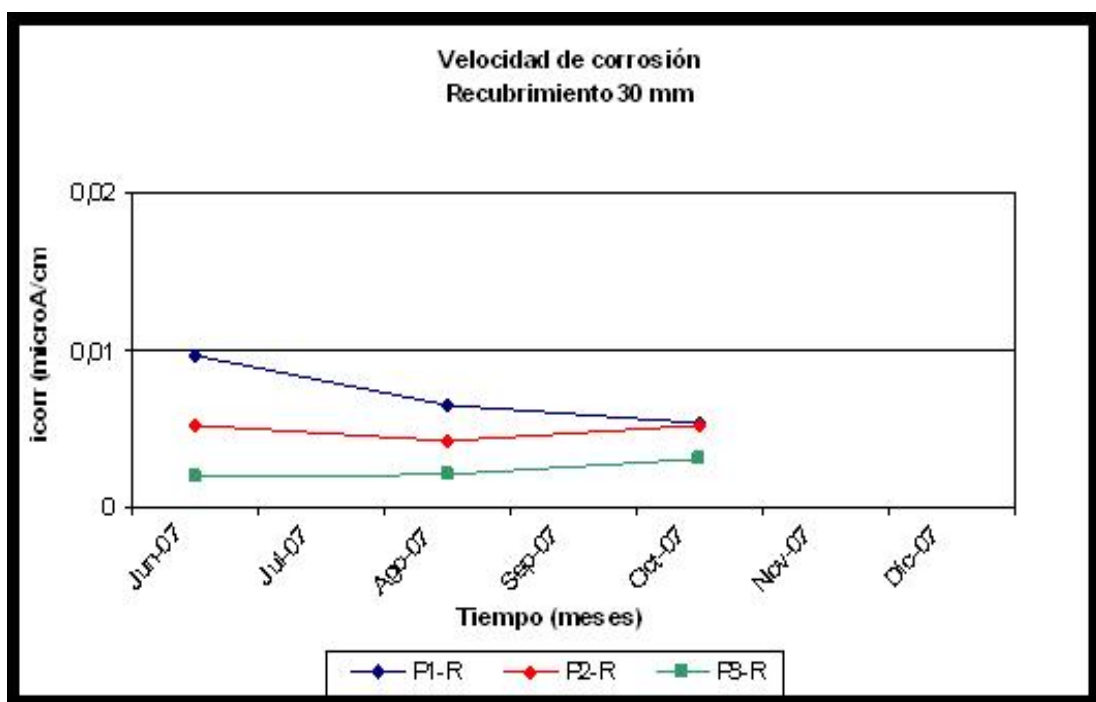
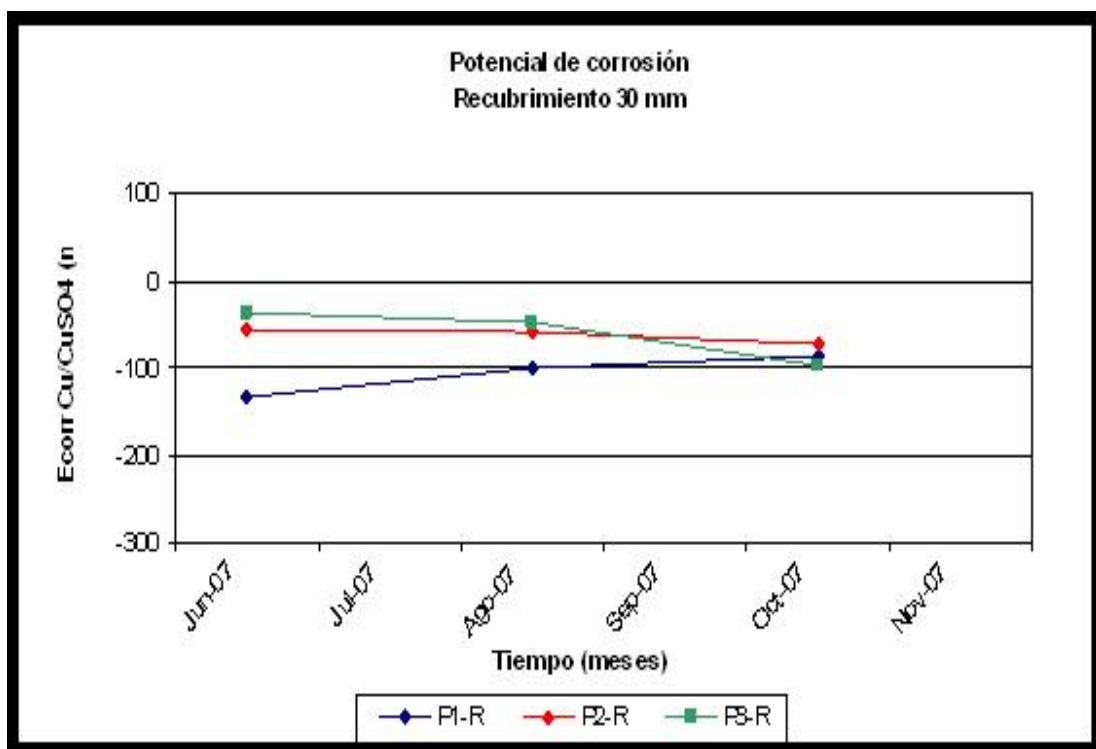


Figura N° 75. Estación San José. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)



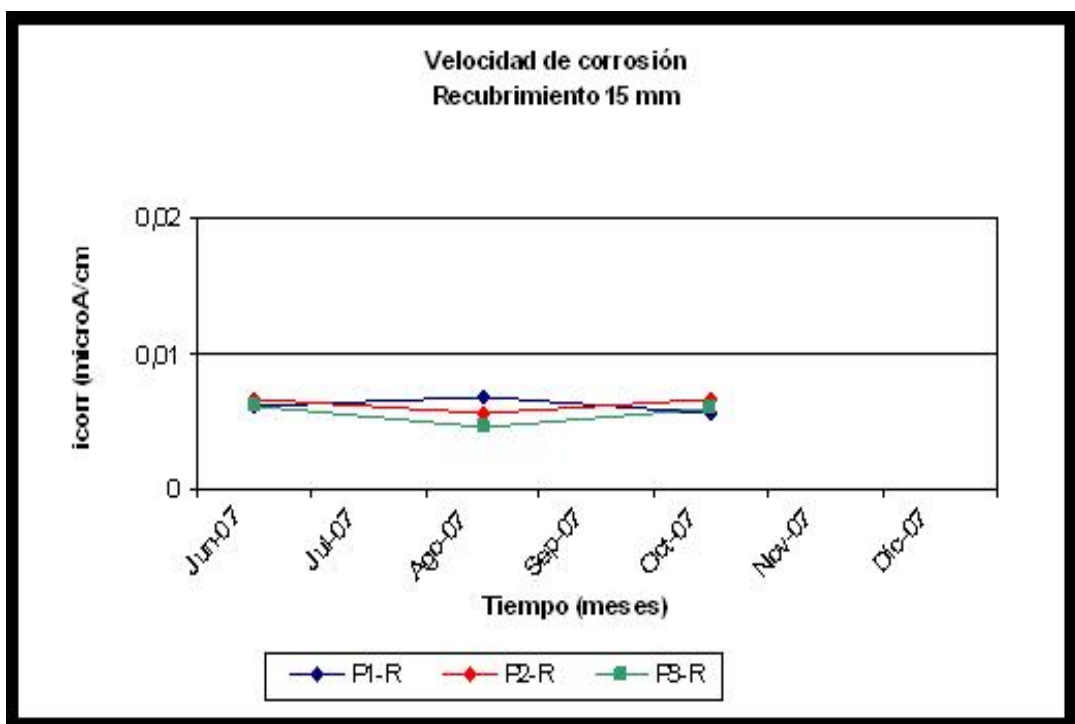
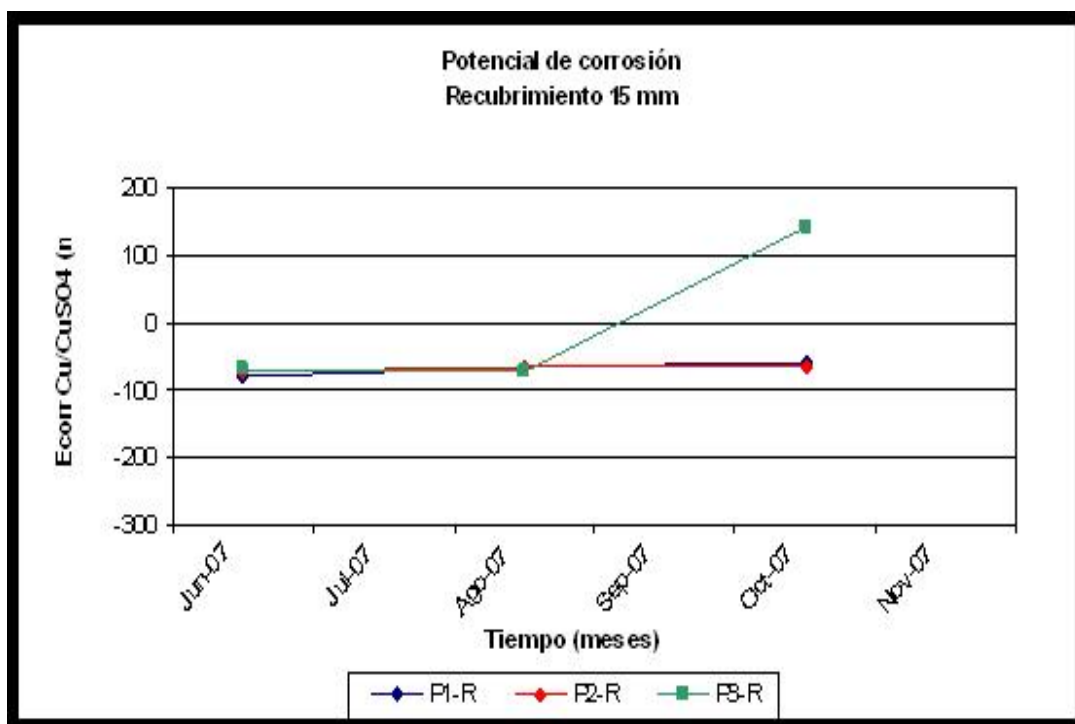


Figura N° 76. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

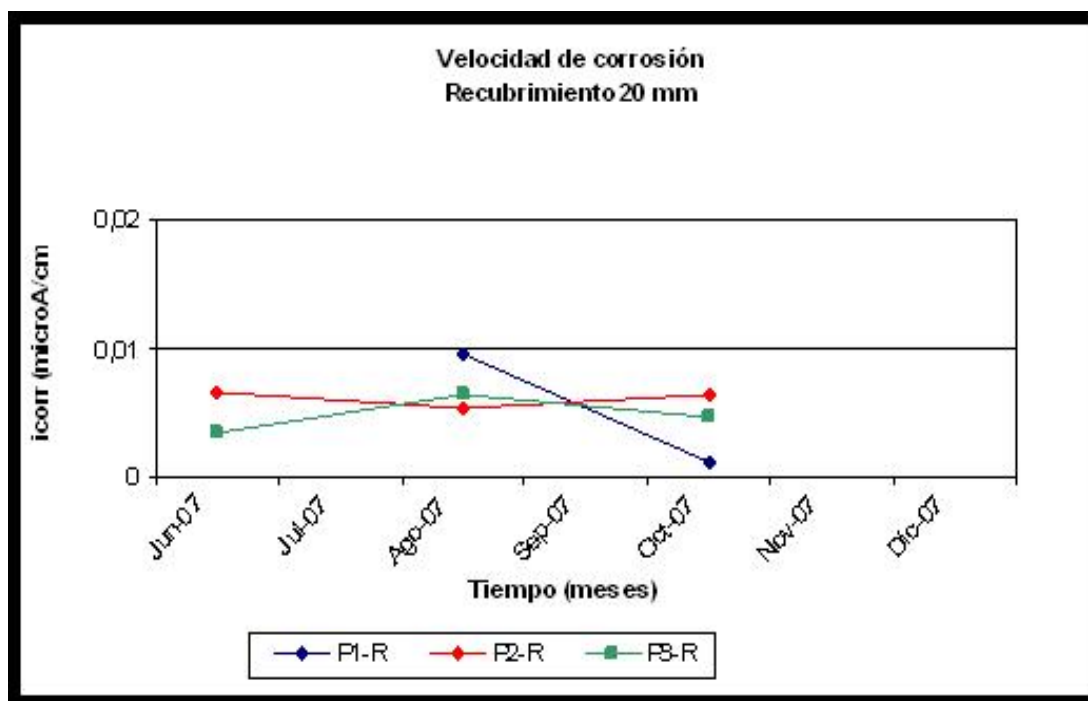
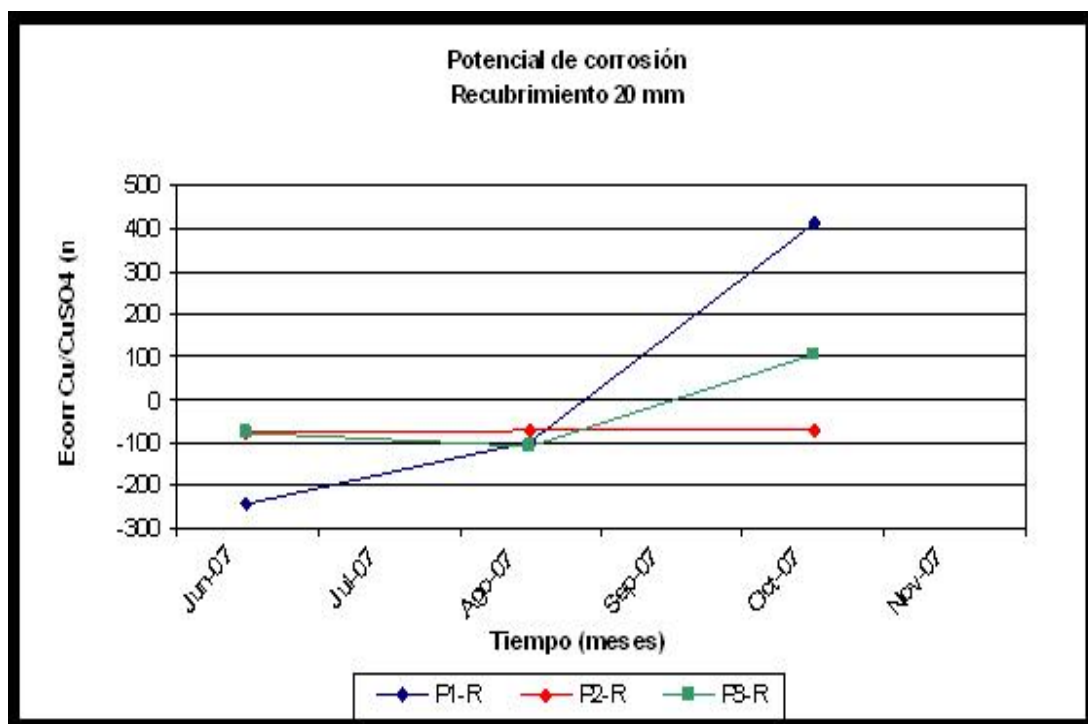


Figura N° 77. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

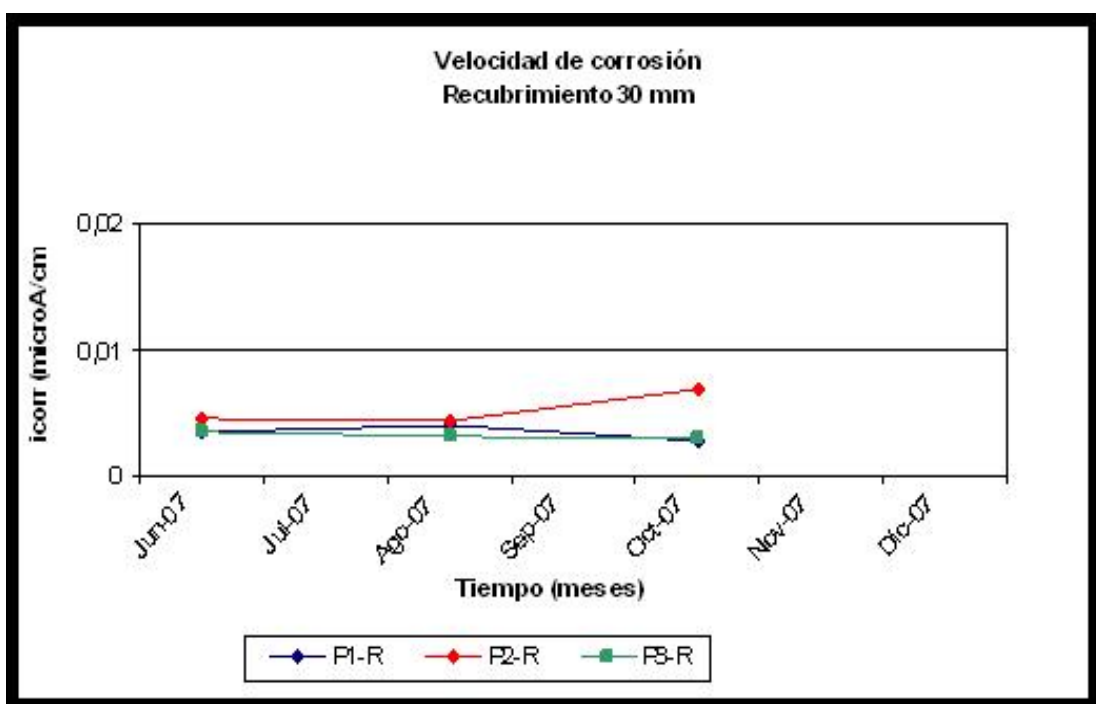
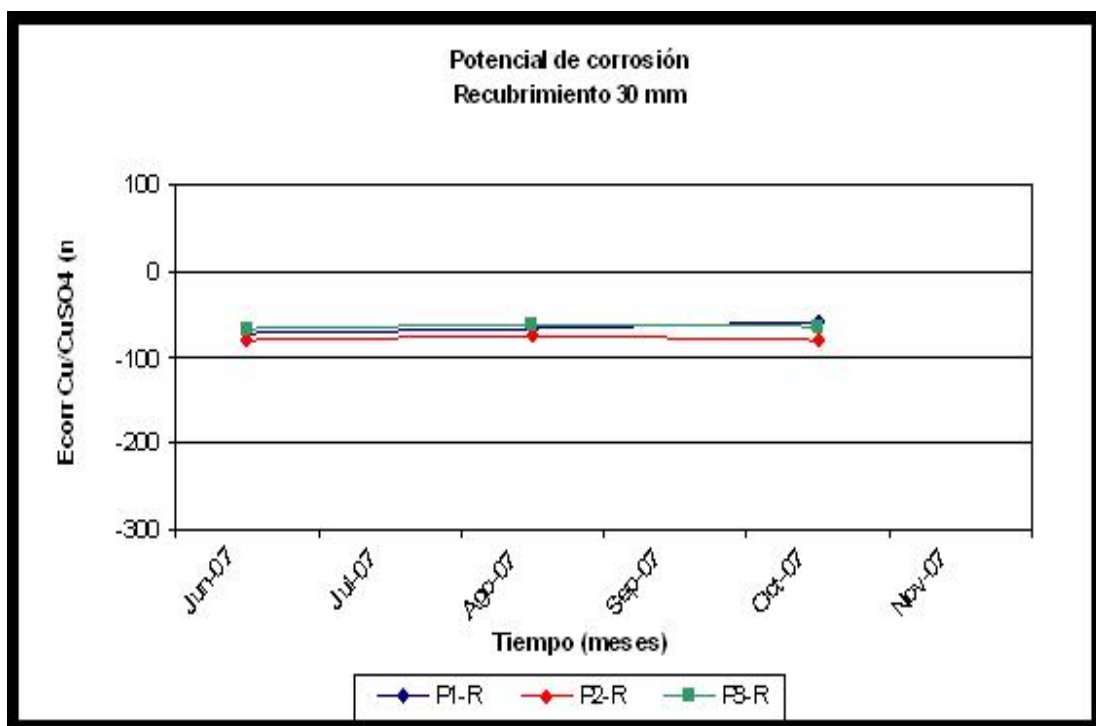


Figura N° 78. Estación San José. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

## 2.4 Estación Moín

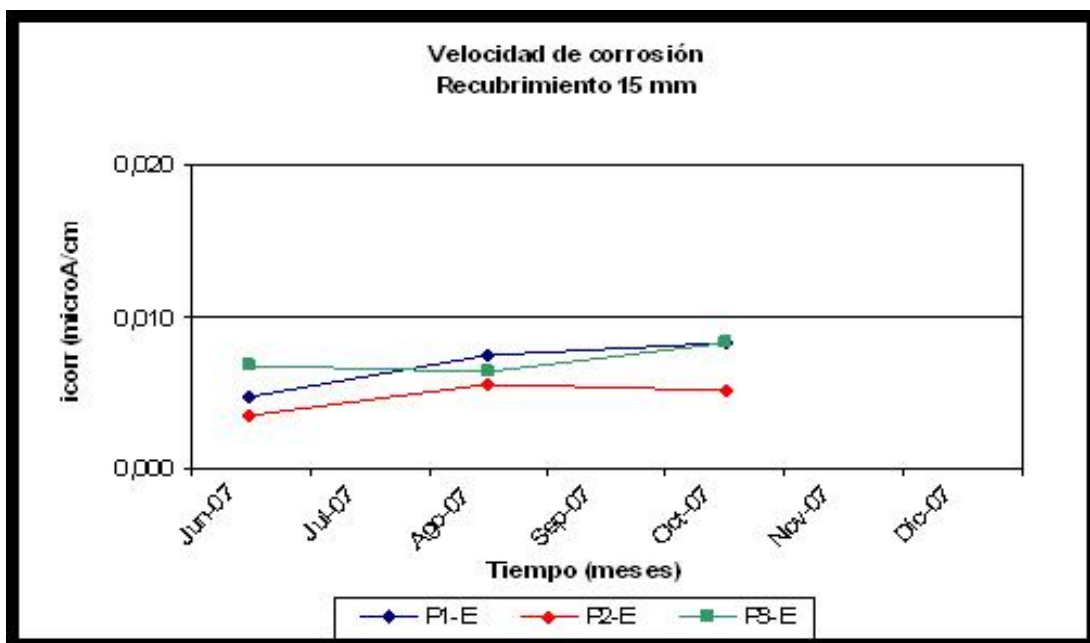
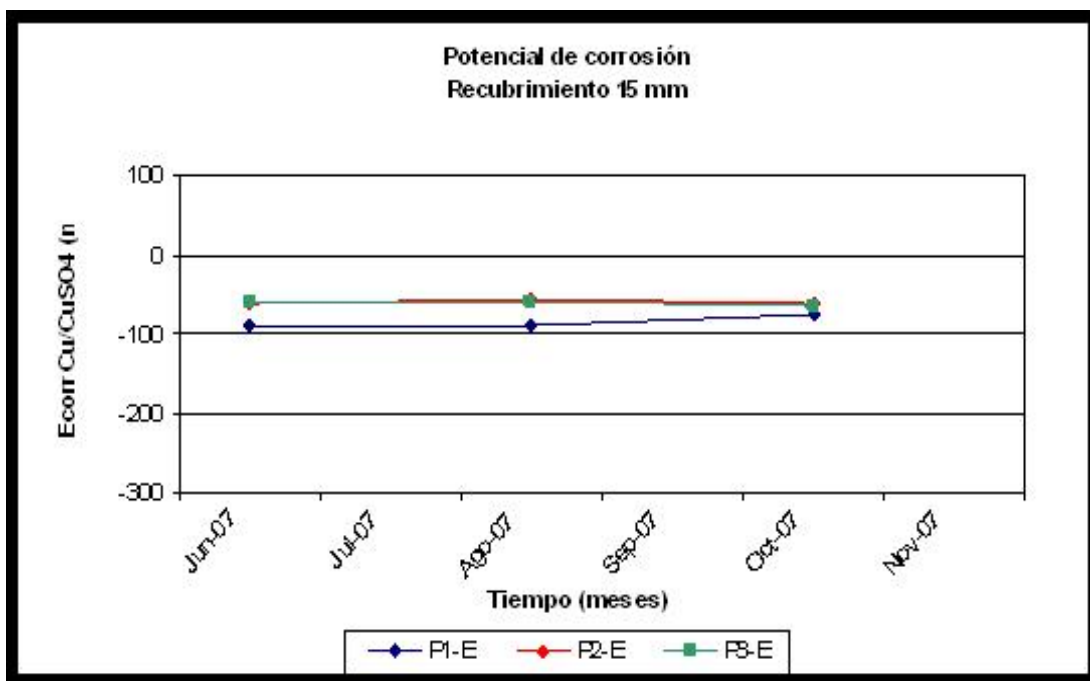


Figura N° 79. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

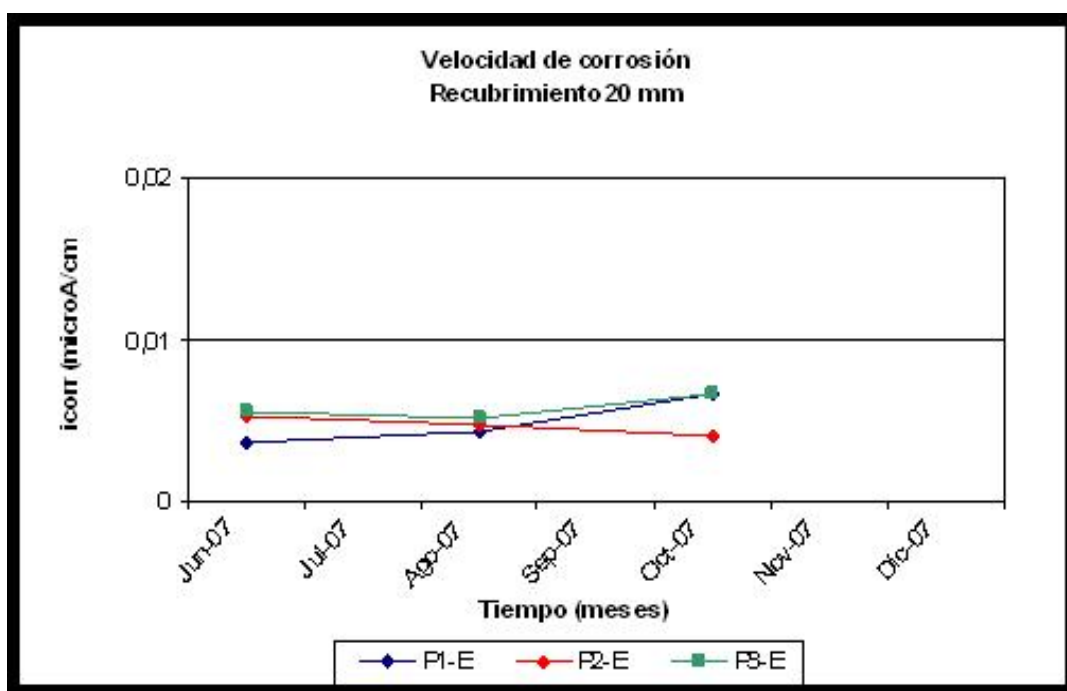
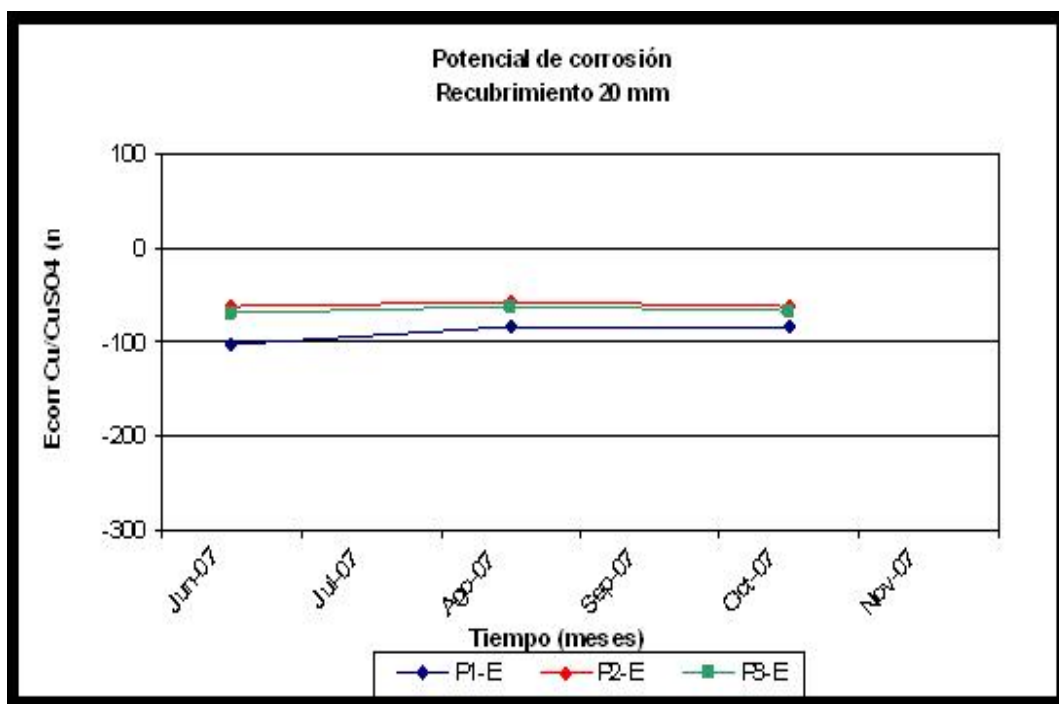


Figura N° 80. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

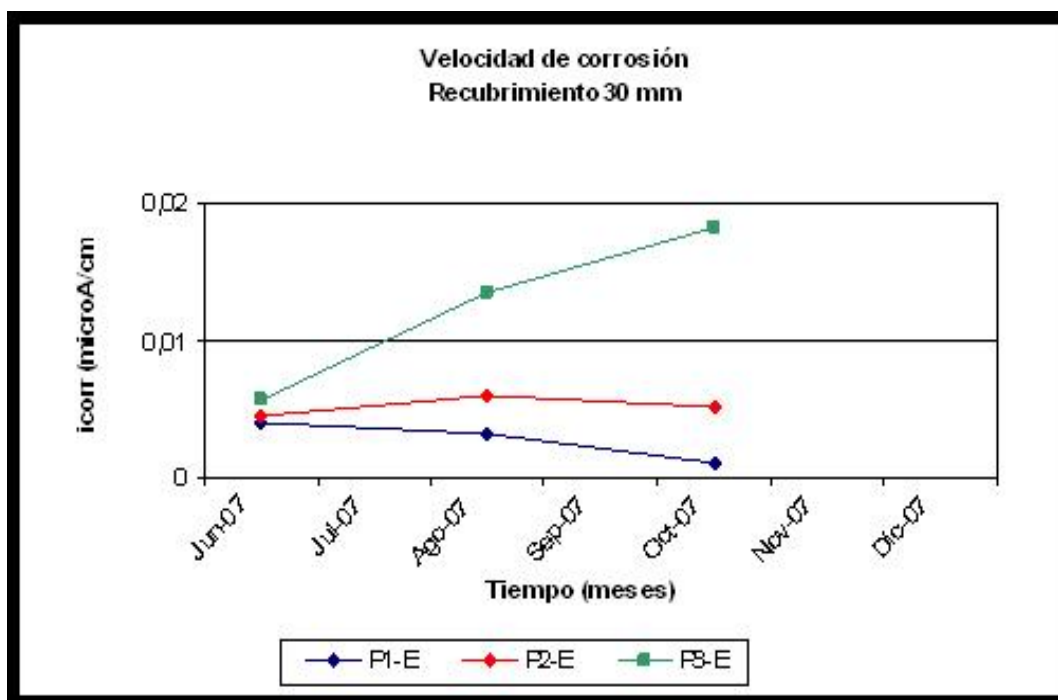
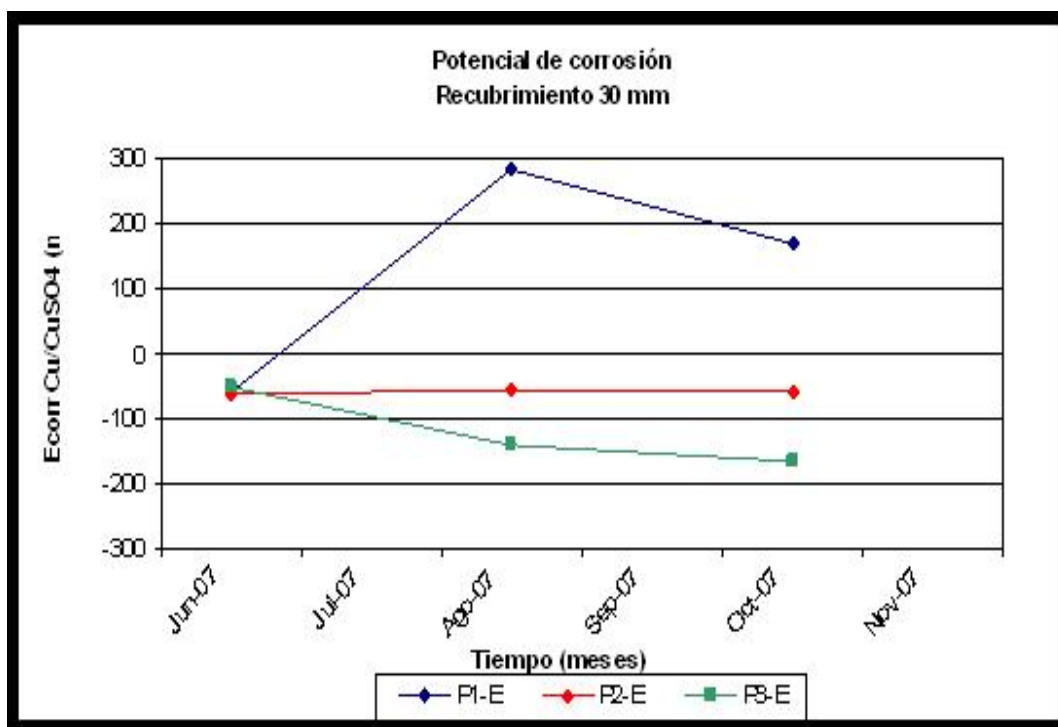


Figura N° 81. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

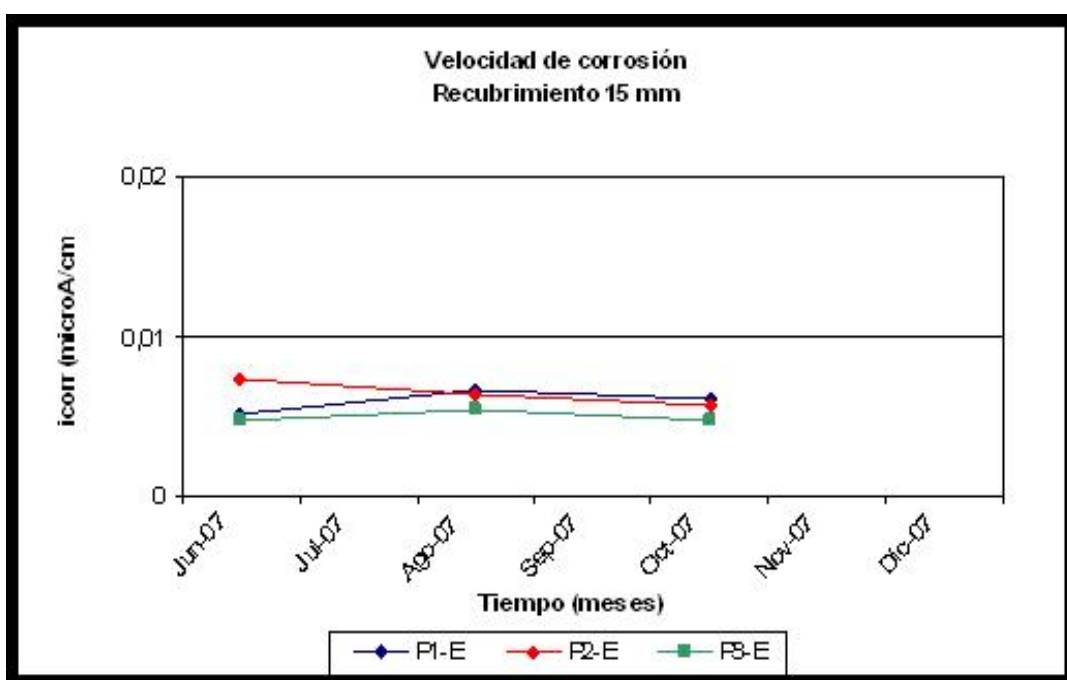
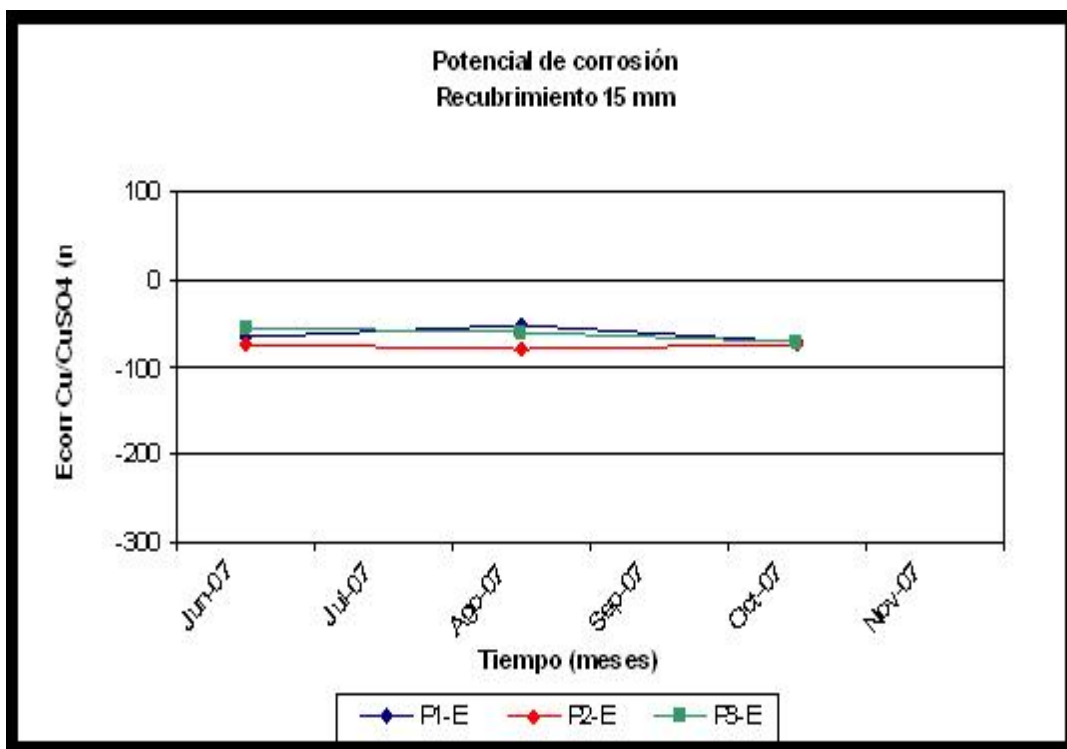


Figura N° 82. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

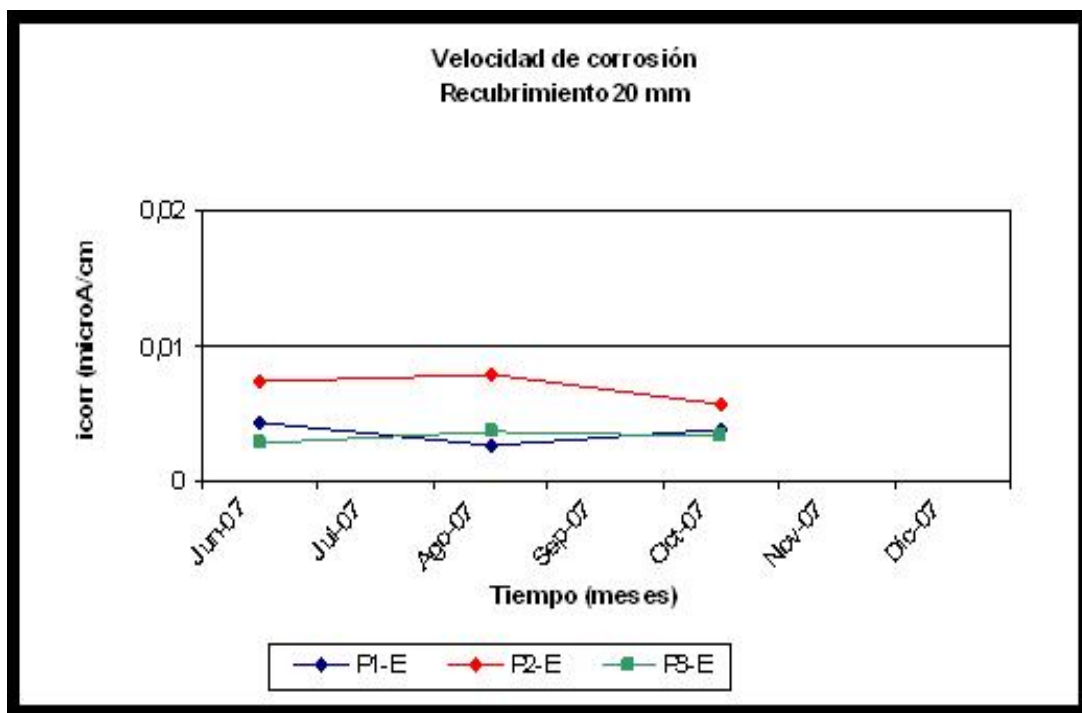
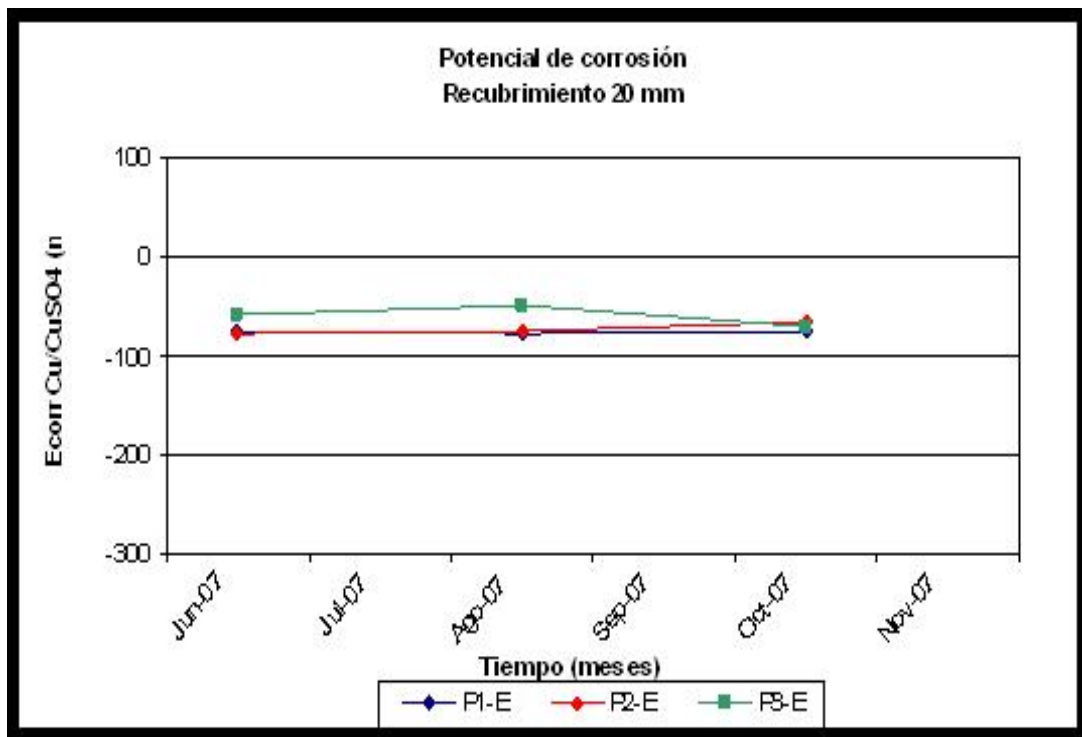


Figura N° 83. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)



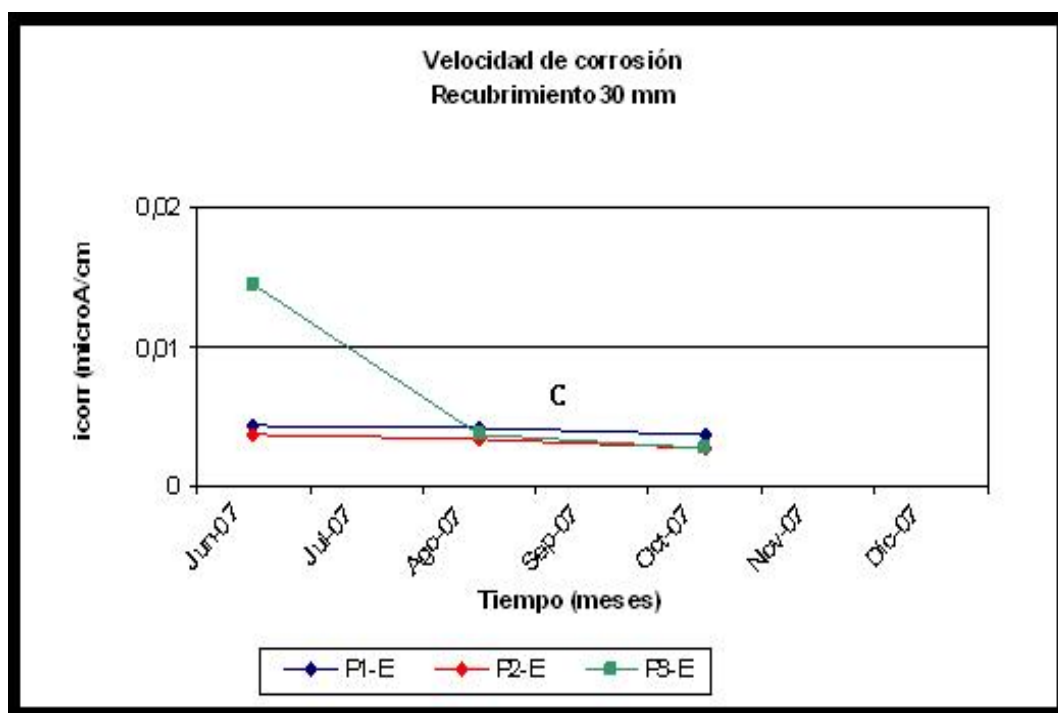
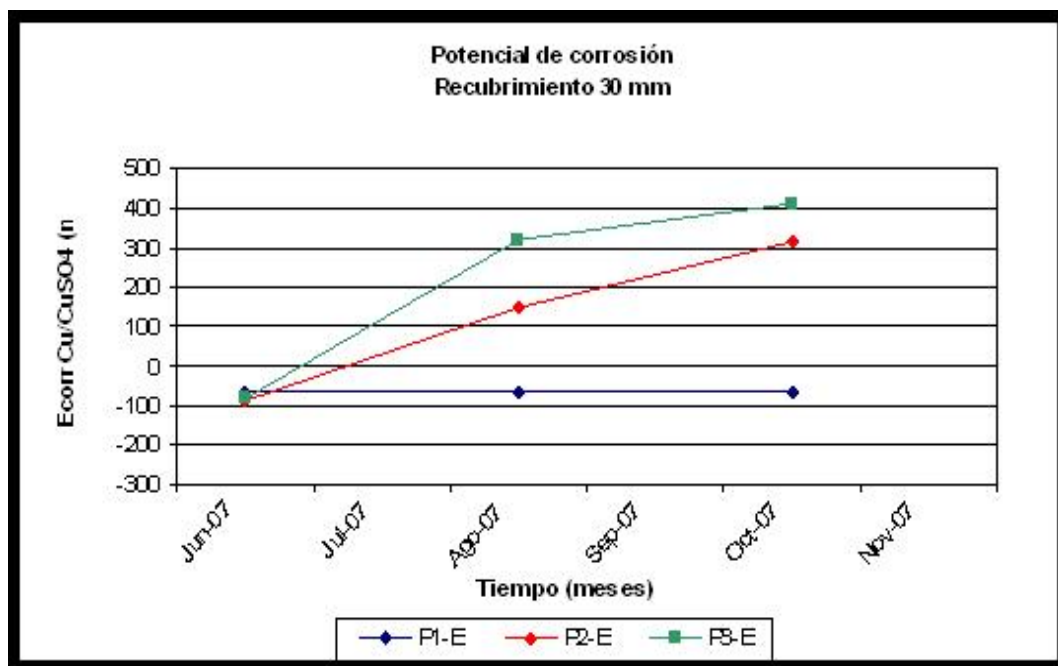


Figura N° 84. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara expuesta, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

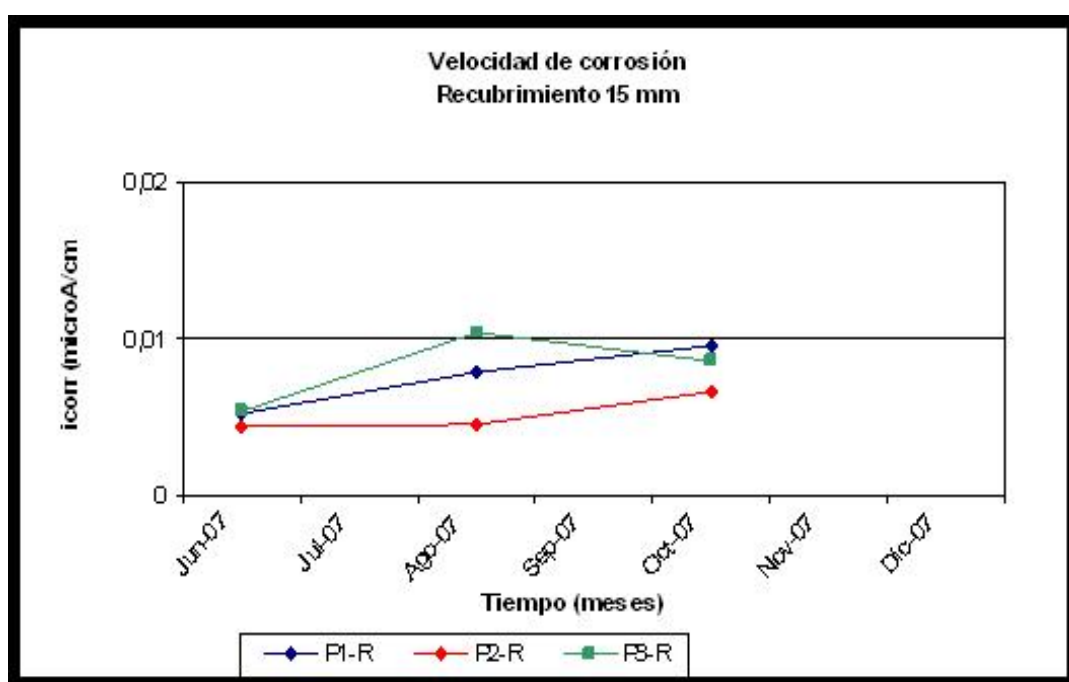
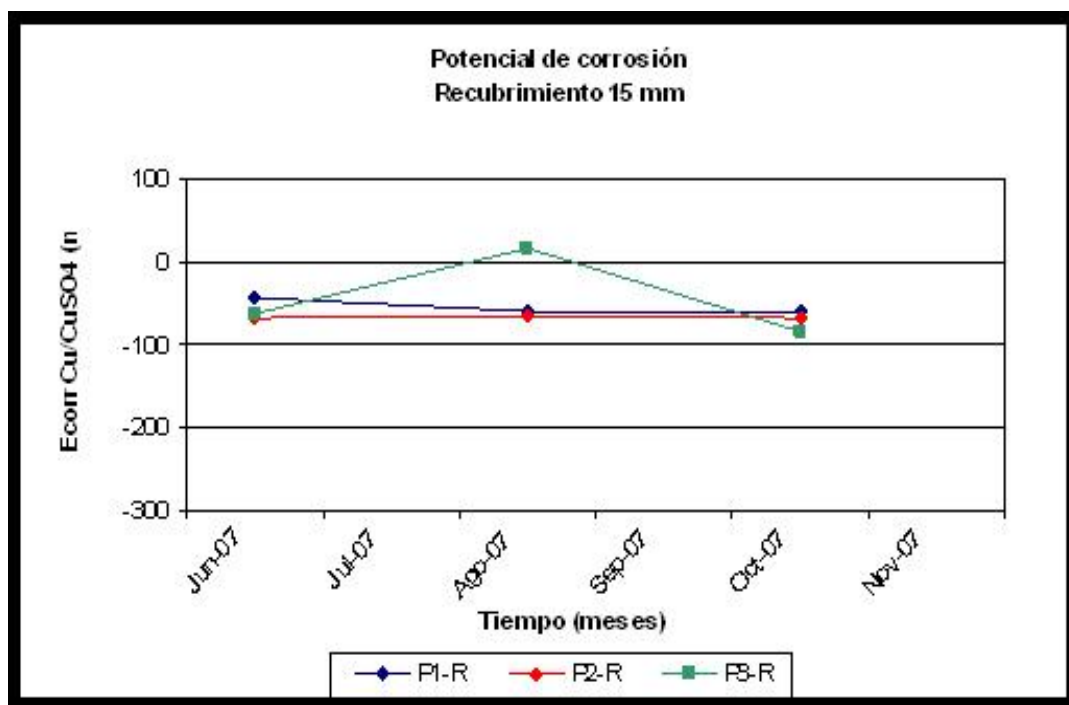


Figura N° 85. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

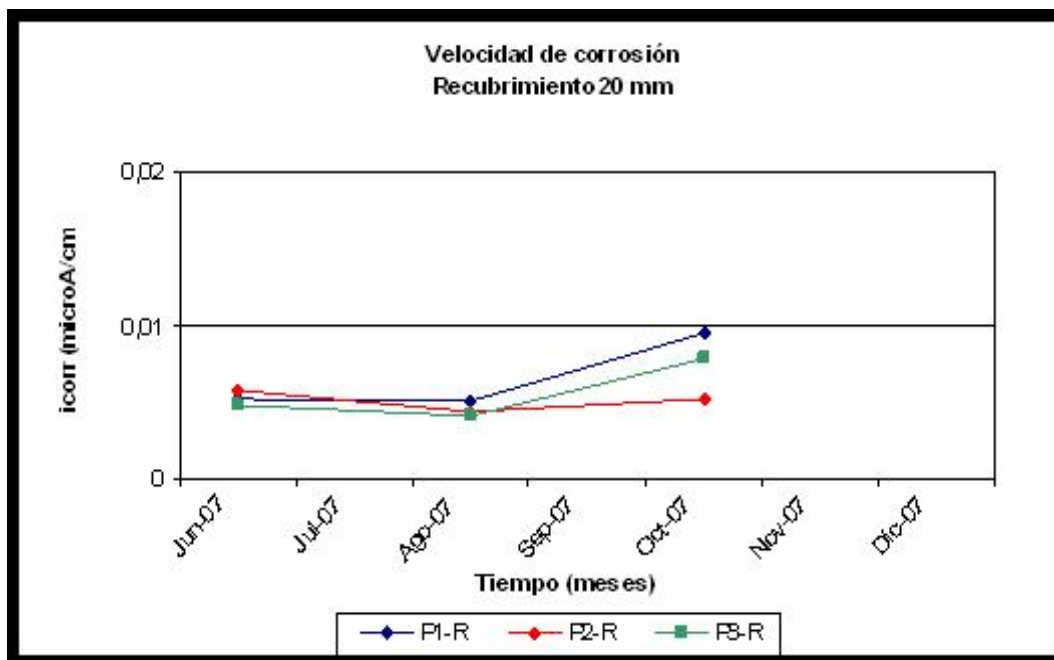
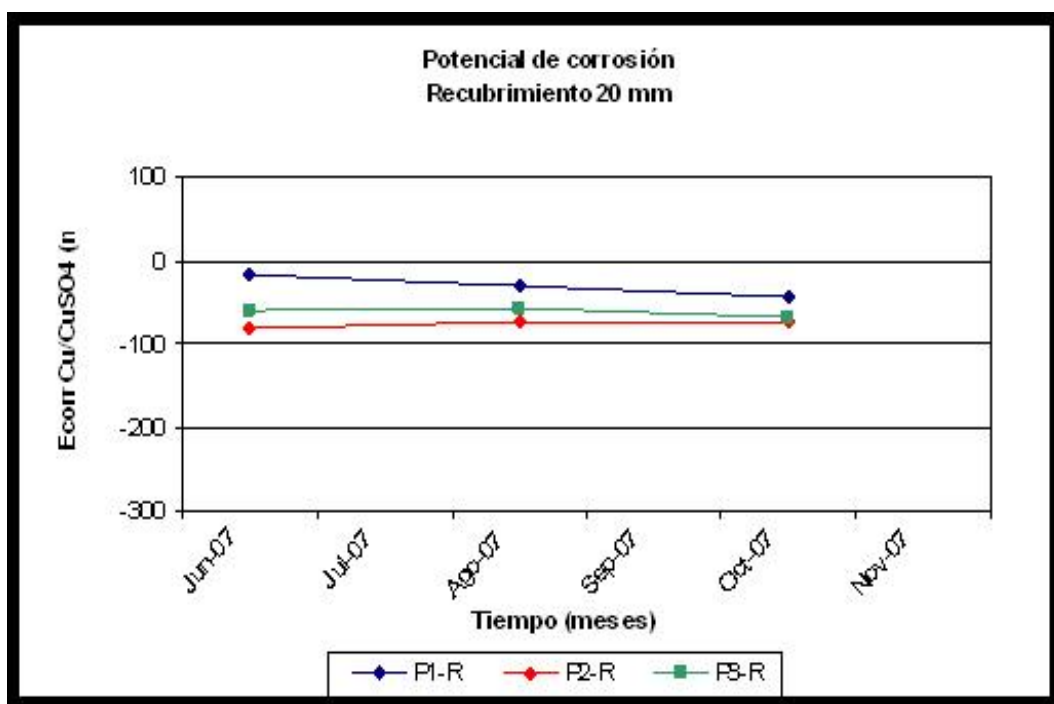


Figura N° 86. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

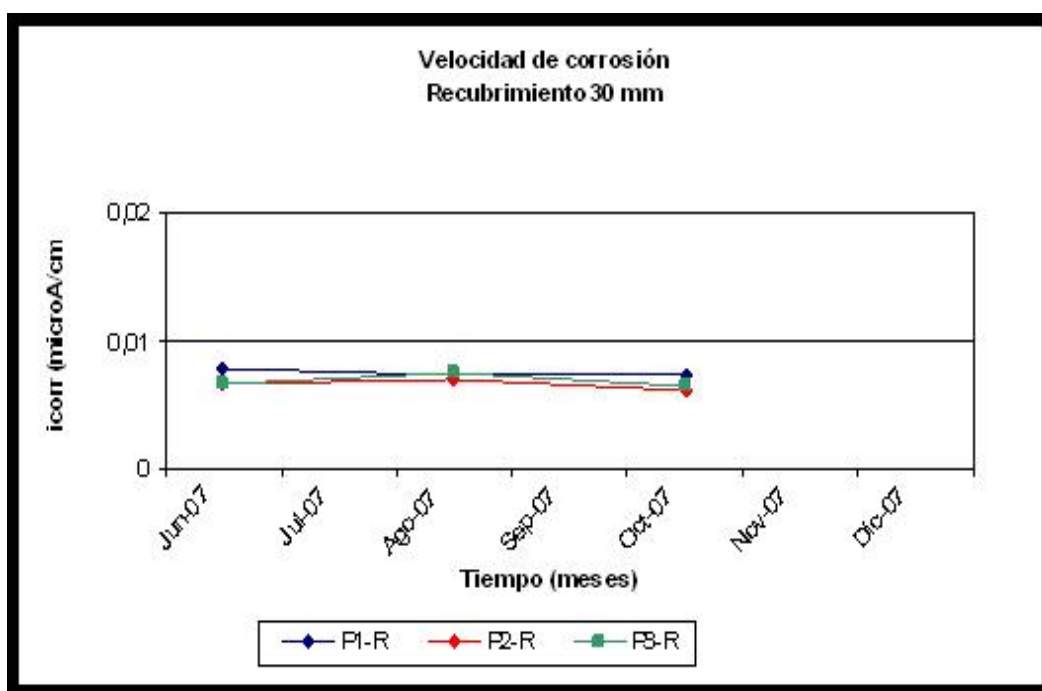
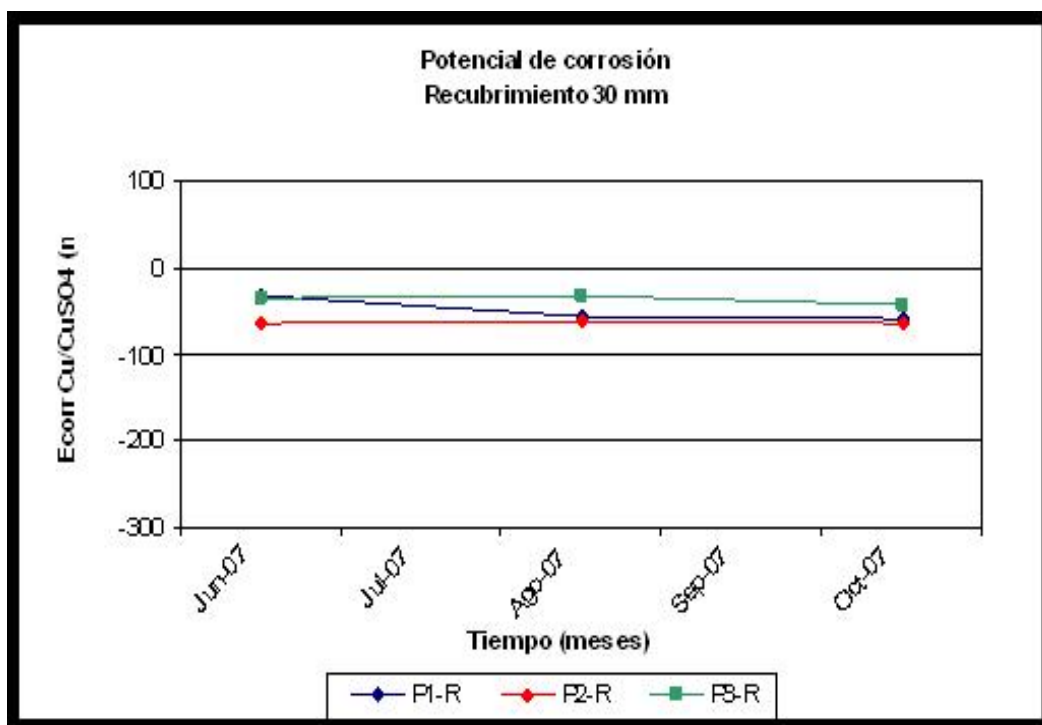


Figura N° 87. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,45. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

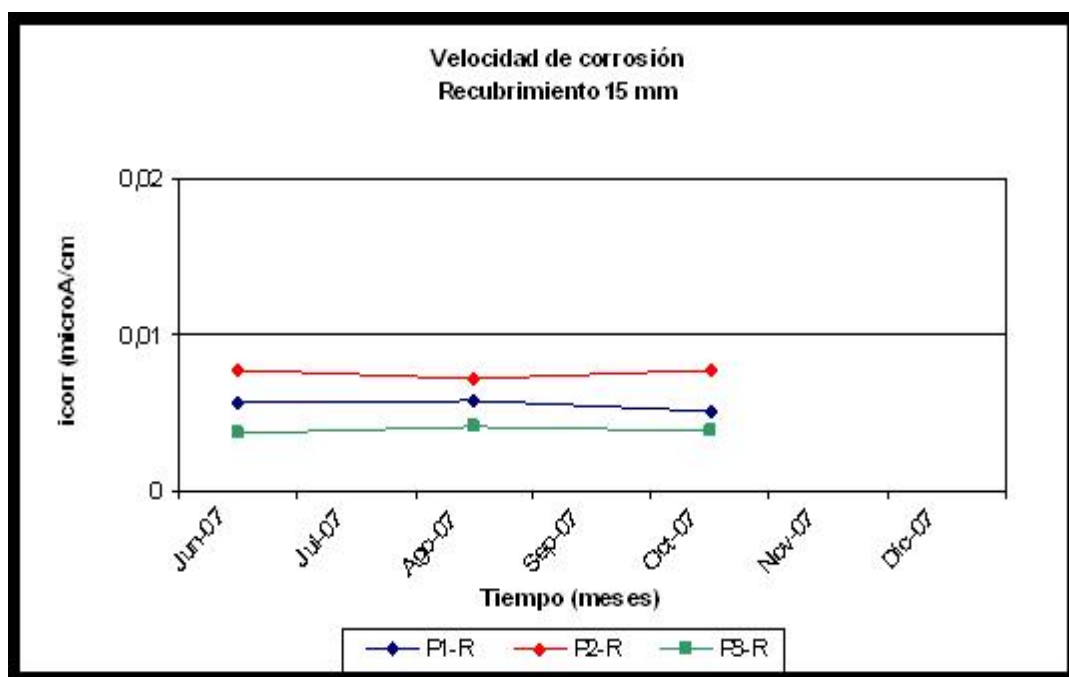
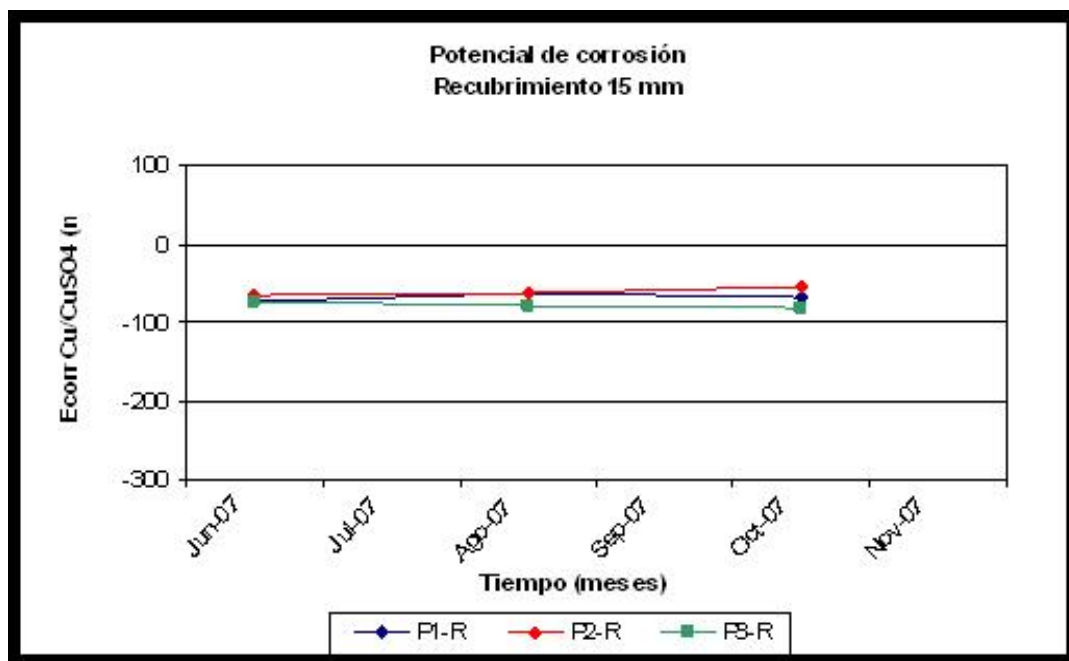


Figura N° 88. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 15mm)

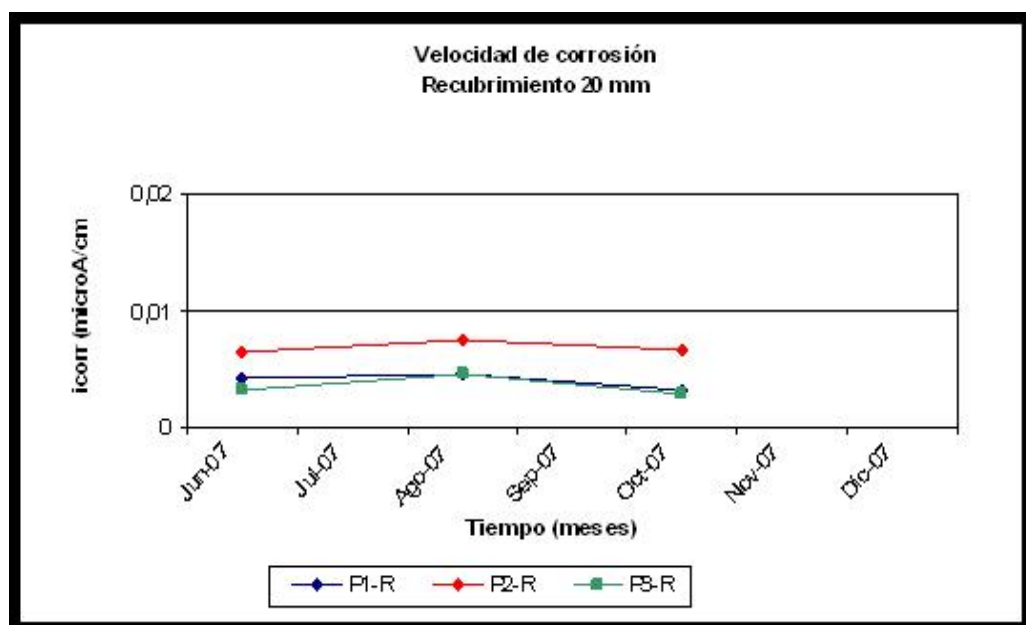
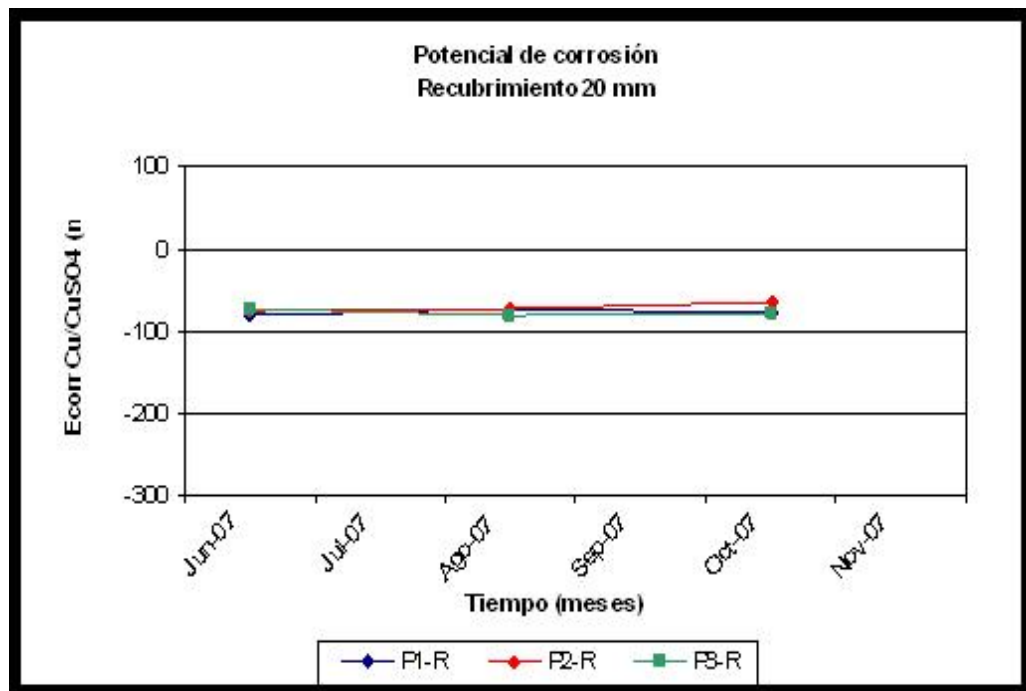


Figura N° 89. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 20mm)

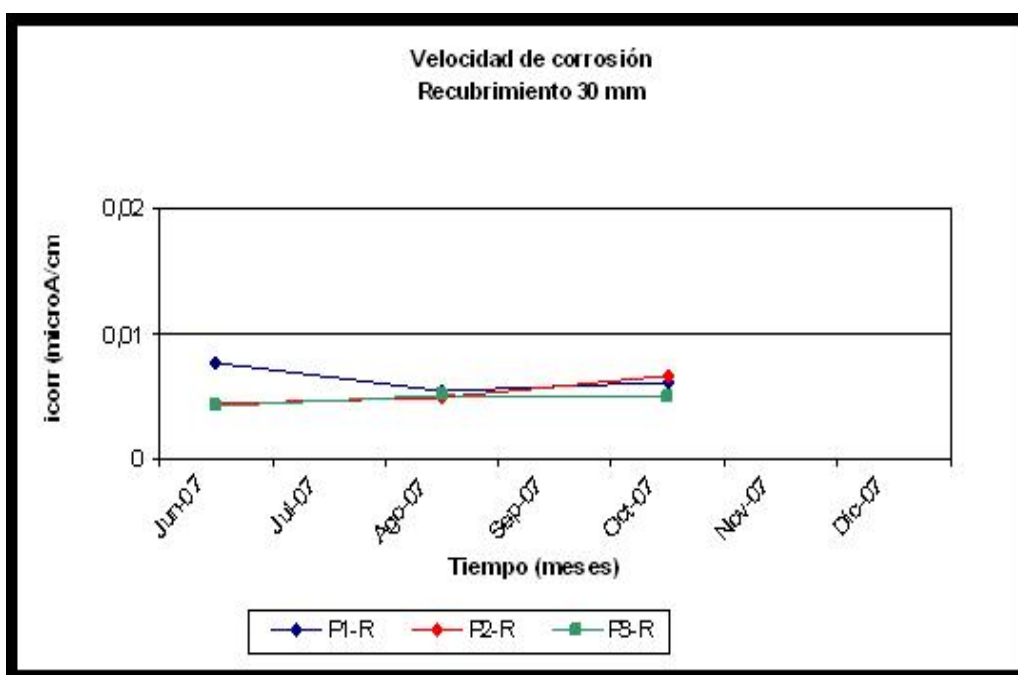
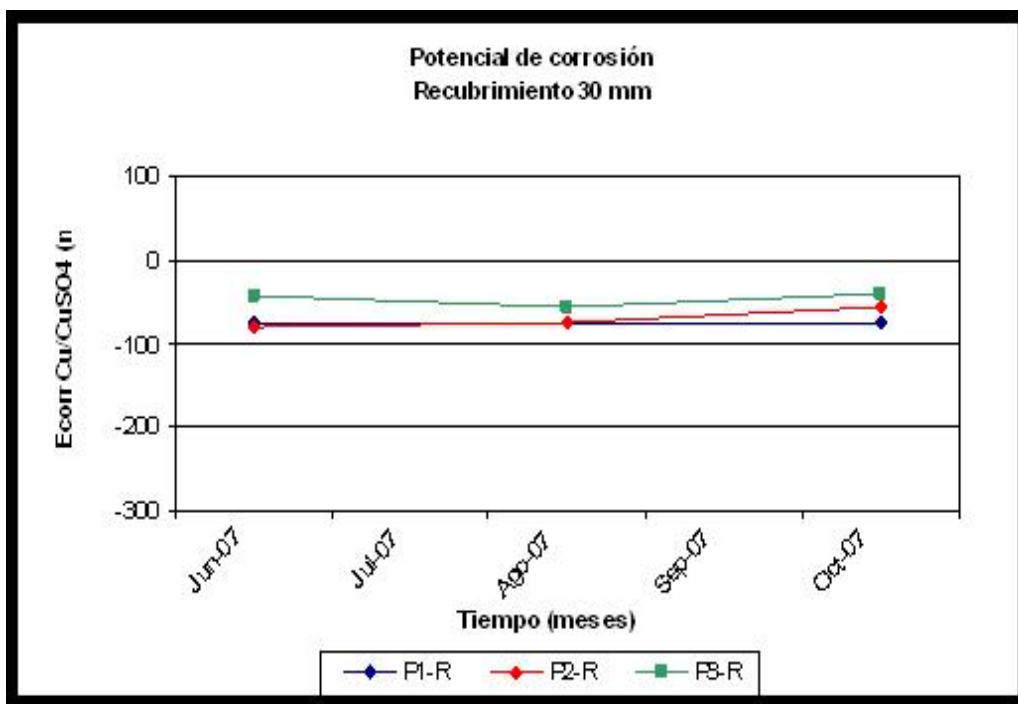


Figura N° 90. Estación Moín. Mezcla a/c = 0,65. Variación del Potencial y velocidad de Corrosión en la cara resguardada, durante el tiempo de exposición (Recubrimiento 30mm)

## **E. Procedimientos de Ensayos**

### ***1. Medidas de resistividad***

#### **Equipo**

- Resistómetro Megger.
- 2 placas de acero inoxidable.
- Recipiente de plástico con tapa
- 2 esponjas.
- Cable.
- Pinzas (lagartos)
- Masa de 2kg, aproximadamente.
- Plástico.
- Probetas.

#### **Procedimiento**

1. Las probetas se cortan en forma de cubos y se miden las áreas de las caras expuesta y resguardada, así como la separación entre ambas.
2. Se colocan las probetas sobre una rejilla, en el fondo de un recipiente plástico, se agrega agua destilada hasta llegar a la mitad de la altura de la rejilla; además, se rocían las probetas y se tapa el recipiente. Lo anterior para simular una cámara de humedad.
3. Se rocían las probetas con agua destilada, tres veces al día durante tres días o hasta lograr la saturación de las probetas.
4. Conexiones con el equipo:



- a. Se hacen dos puentes en el Megger, cada uno, entre una de las salidas de corriente (los extremos) y una de las salidas de voltaje (los internos).
  - b. Conectar cada puente a una placa de acero inoxidable,
5. Ensayo:
- a. Se coloca un pedazo de plástico sobre la mesa de trabajo, Esto con el fin de crear un aislamiento eléctrico entre la probeta y el concreto de la mesa del laboratorio.
  - b. Luego sobre éste una placa de acero inoxidable, conectada al Megger, seguida de una esponja humedecida, luego la probeta, una esponja humedecida y por último una placa de acero inoxidable conectada al Megger.
  - c. Sobre el sistema armado, colocar un plástico.
  - d. Por último colocar la masa de contrapeso.
6. Realizar las mediciones.
7. Repetir los pasos anteriores durante varios días hasta que la medición se estabilice.

### **Consideraciones**

- El rocío de las probetas busca saturarlas con agua destilada, sin embargo, se deben humedecer sin excesos pues se puede dar la pérdida de cloruros y contaminantes presentes en el concreto, lo que puede alterar las mediciones.
- La medición debe hacerse con un resistómetro y no con un multímetro para obtener mayor precisión.
- La primera medición que debe hacerse es la de la resistencia de la esponja, pues esta hay que restarla a la resistencia de la probeta. Esta medición se realiza sin la probeta y realizando el mismo procedimiento.

## **2. Penetración de cloruros**

El objetivo de esta prueba, es determinar el perfil de concentración de los cloruros totales y solubles, presentes a diferentes niveles de profundidad en la masa de concreto. Este resultado permite calcular el coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior del concreto y con ello, la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Esta información, interrelacionada con otras variables permite analizar el estado actual de la estructura y a su vez; estimar el tiempo que tardará este ión en alcanzar la varilla de refuerzo

### **Equipo**

- Instrumento para cortar las probetas.
- Marcador permanente para identificar las muestras.
- Mazo.
- Material sobre el que se empieza el tratamiento de muestra
- Mortero o recipiente para poner la muestra que se pulveriza.
- Pistilo o elemento para pulverizar las muestras.
- Bolsas plásticas.
- Placa metálica.
- Cedazo de nylon.

### **Procedimiento**

1. De las probetas de concreto sin varilla, colocadas en cada estación, cortar muestras cúbicas, de aproximadamente 5cm de lado.
2. Cortar las muestras en muestras más pequeñas de aprox. 1cm de lado.
3. Identificar cada muestra, con un marcador, escribiendo sobre la misma, cara expuesta o resguardada según corresponda, además indicar el número de probeta.
4. Moler el concreto:
  - a. Pesar la bolsa de recolección en una balanza granataria y anotar.

- b. Identificar la bolsa de recolección de muestra con el nombre de la estación, número de la probeta y la cara (expuesta o de resguardo).
  - c. Colocar sobre la mesa de trabajo, el material sobre el que se empieza la molienda gruesa de la muestra de concreto.
  - d. Colocar la muestra en una bolsa.
  - e. Sobre una placa de metal, colocar la bolsa con la probeta o muestra.
  - f. Golpear con el mazo hasta obtener trozos pequeños.
  - g. Tamizar, con el cedazo y recolectarlo en el mortero.
  - h. Moler con el pistilo hasta obtener un polvo fino.
  - i. Recolectar 13g (con balanza granataria) de este polvo en la bolsa previamente pesada de **a**.
5. Limpiar la superficie de trabajo y lavar el mortero, el pistilo y el mazo.
  7. Repetir desde el punto **4**. con cada muestra.
  8. Enviar a laboratorio para análisis químico.

### **Consideraciones**

- Las bolsas plásticas en las que se pone la probeta para ser molida, tienen la función de aislar la muestra y evitar que se contamine.
- La cantidad de estas bolsas, para cada probeta, depende de la facilidad con la que se quiebra el concreto sin romper la bolsa y de las necesidades de la persona que realiza la molienda. Se pueden realizar varios cambios de bolsa o utilizar varias bolsas a la vez, para obtener un tamaño manejable para el moedor, de manera que la molienda en el mortero con el pistilo sea mínima.
- Se debe asegurar la limpieza de la superficie y de los implementos utilizados para cada probeta, pues la muestra se puede contaminar con la muestra anterior, lo que induce a errores la estimación de concentración de cloruros.

## **V. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **A. Caracterización de la(s) atmósfera(s)**

Como se observa de las figuras N° 15 a la N° 38, aunque se evalúan cuatro atmósferas distintas, en general la temperatura promedio oscila alrededor de 20°C y la humedad relativa por encima del 70%, condiciones sumamente favorables para que se den procesos de corrosión, puesto que se permite la adsorción de contaminantes atmosféricos como el CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>. Sin embargo, tal y como se observa en el cuadro 2, posiblemente la alta cantidad de precipitaciones que presenta nuestro país (desde 1525mm en Pavas hasta 3592mm en Póas) no permite que dichos contaminantes se concentren en la atmósfera en cantidades significativas.

La cantidad de cloruros reportados es sumamente baja, en especial para Moín, que es una atmósfera marina, probablemente el método de monitoreo de este contaminante no sea el apropiado para las condiciones típicas de esta región de nuestro territorio, esto debido a que las velas no mantienen la humedad requerida por este método de análisis.

La alta concentración de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> reportada para la estación de Moín, se debe a que la misma se encuentra ubicada contiguo a la Planta Termoeléctrica del ICE, lo cual incrementa la corrosividad de esta zona.

### **B. Identificación de las mezclas**

Como se observa en el cuadro N° 4, en este proyecto se están evaluando dos tipos de mezclas de concreto, ambas tipo Pórtland, uno de baja relación agua/cemento considerado durable (a/c 0,45), y del cual se obtuvo mayor resistencia a la compresión (1,8 veces más que en el concreto de a/c 0,65) y propiedades físico-químicos mejores, que la otra mezcla utilizada, ver cuadro N° 5. No fue necesario utilizar ningún tipo de aditivo para las mezclas empleadas.

Dado que la porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida, tal y como era de esperar la porosidad total es mayor en el concreto de a/c 0,65 que en el de a/c 0,45, ver cuadro N° 5. Además, puesto que la porosidad capilar esta directamente relacionada con la cantidad de agua presente en el concreto, ésta es menor para el de a/c 0,45 que para el de a/c 0,65 cuya cantidad de agua es mayor, lo cual hace que el ataque por carbonatación y cloruros sea menor en la mezcla durable.

## **C. Evaluación de la penetración de contaminantes en el concreto**

### ***1. Penetración de cloruros***

La concentración de cloruros determinados en la mezclas empleadas se encuentran por debajo 0,4% por peso del cemento: siendo menores a 0,01% en el caso de los cloruros libres y entre 0,01 y 0,04% para los cloruros totales, ver figuras 39-42. Estos resultados demuestran que la agresividad por cloruros es muy baja puesto que las concentraciones determinadas están muy por debajo del límite permitido para este contaminante, según la norma española EH 91. Es importante mencionar que de estos resultados, los cloruros libres son los que interesan, pues son los que pueden activar la corrosión de las varillas. Esto concuerda con los resultados obtenidos de cloruros atmosféricos monitoreados a través de las velas húmedas, cuyas concentraciones son sumamente bajas, lo cual podría estar relacionado con las altas precipitaciones anuales que impiden que dichos contaminantes se concentren en cantidades importantes en el ambiente.

## **2. Resistividad y penetración de la carbonatación, $e_{CO_2}$**

Los resultados de los cuadros N° 6 y N° 7 demuestran que, en general, el efecto debido a la carbonatación es muy bajo. Los valores de la constante de carbonatación,  $K_{CO_2}$  oscilan entre 2 a  $3\text{mm/año}^{0.5}$ , lo cual es indicativo de elevadas resistencias a la carbonatación (según el Manual DURAR), con excepción de la estación de Pavas, cuyos valores medios de  $K_{CO_2}$  están entre 4,7 y  $5,7\text{mm/año}^{0.5}$ , lo cual corresponde a concretos con resistencias medias a la carbonatación. Este resultado obtenido para Pavas, es coincidente con las concentraciones de contaminantes atmosféricos presentes en atmósferas urbano-industriales, como ésta, ver cuadro N° 2.

En general los valores de resistividad fueron mayores para la mezcla de a/c 0,45 (alrededor de  $30\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ ) que para la mezcla de a/c 0,65 (alrededor de  $25\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ ), lo cual es de esperar, puesto que el concreto de a/c 0,45 es mucho más denso y por tanto menos conductivo que el de 0,65.

## **D. Medidas Electroquímicas**

### **1. Resultados de las medidas electroquímicas**

Tal y como se observa en las figuras N° 43 - N° 90 los valores de potencial de corrosión oscilan entre -100 y 400mV, asimismo la velocidad de corrosión es mucho menor a  $0,03\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Estos valores de potencial y velocidad indican que el acero de refuerzo se encuentra en estado pasivo en el concreto y aún no se ha iniciado ningún proceso de activación del mismo. Solamente se presenta un caso en la estación de Pavas, donde la barra correspondiente a 15mm de espesor de recubrimiento y relación a/c 0,65 en la cara expuesta (figura N° 58), presenta valores de potencial de alrededor de -300mV y de velocidad de corrosión de alrededor de  $0,15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , los cuales indican que esta barra se encuentra en estado activo de corrosión. Sin embargo, este fenómeno solamente se ha presentado en esta probeta y hasta el momento sólo ha afectado la barra de

menor espesor de recubrimiento, pero en este caso la activación fue influenciada por la presencia de una grieta a lo largo de esta barra, la cual accidentalmente se produjo en la probeta y se decidió no repararla para evaluar el efecto que la misma podría producir en la velocidad de corrosión. Se logró determinar que efectivamente esta grieta produce un efecto acelerador del fenómeno de corrosión, puesto que los valores de potencial y velocidad de corrosión, tal y como se comentó anteriormente corresponden con los del estado activo de corrosión. Esto probablemente porque la grieta facilita el ingreso de contaminantes atmosféricos, tales como: cloruros,  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ , típicamente característicos de zonas urbano-industriales como la de esta estación.

Se presentan además, algunos casos aislados, por ejemplo en la probeta 1 de Póas, San José y Moín (ver figuras N° 43, N° 49, N° 77 y N° 81), donde se han obtenido valores de potencial de corrosión muy positivos, los cuales probablemente en la mayoría de los casos están asociados a procesos de carbonatación mayores y, en general, a bajas resistividades en estas probetas.

## VI. CONCLUSIONES

1. La temperatura y humedad relativa del país son condiciones propicias para que se den los procesos de corrosión.
2. El método de recolección de cloruros atmosféricos aparentemente no reproduce los resultados esperados en condiciones marinas.
3. La planta termoeléctrica del ICE, en Moín, influencia los resultados en las concentraciones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ .
4. El concreto más denso (a/c 0,45) presenta mayor resistencia al ataque por carbonatación y cloruros, por tanto mayor resistividad.
5. La baja concentración de cloruros en el ambiente, en todas las estaciones, evidencian la baja agresividad de este contaminante.
6. Las condiciones climáticas presentes en la atmósfera urbano-industrial han producido un ataque medio, de carbonatación, que ha afectado el concreto pero no la varilla.
7. Los potenciales y las velocidades de corrosión indican que las barras de refuerzo se encuentran en estado pasivo.
8. Solo una de las probetas se encuentra en estado de corrosión activo y se demostró que fue por la presencia de una grieta que facilitó el acceso de los contaminantes.
9. Una mayor carbonatación en el concreto está asociada a potenciales de corrosión positivos y bajas resistividades.
10. Como producto de este proyecto se elaboraron metodologías para los ensayos de resistividad y penetración de cloruros, así como del equipo medidor de  $\text{CO}_2$  atmosférico; lo cual resulta en un aporte y mejora a la continuidad del proyecto DURACON.



## **VII. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda investigar sobre métodos de recolección alternos al utilizado, en este estudio, para cloruros implementarlos ambientales, con el fin de comprobar la confiabilidad de los resultados obtenidos.
2. Es de suma importancia mantener las medidas de seguridad y buenas prácticas de laboratorio, necesarias en la elaboración, recolección y procesamiento de las velas de plomo utilizadas para monitorear los sulfatos del ambiente, debido a la toxicidad del mismo.
3. Es recomendable investigar e implementar métodos de recolección de sulfatos atmosféricos que sean amigables con el ambiente.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Ávila M., Javier; Genescá, Joan. *Más Allá de la Herrumbre*. México, SEP, 1986.
2. Bradford, Samuel A. *Corrosion Control*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1993.
3. González Fernández, José A. *Control de la Corrosión: Estudio y Medidas por Técnicas Electroquímicas*. Madrid, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, 1989.
4. Bentur, A.; Diamond, S.; Berke, N.S. *Steel Corrosión in Concret*. Londres, Chapman & Hall, 1997.
5. CYTED. *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica*, España, CYTED, 1999.
6. CYTED. Manual de Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. 3ra edición. CYTED, Río de Janeiro, 1997.
7. European Federation of Corrosion Publications. Guidelines on Electrochemical Corrosion Measurements #4. The European Federation of Corrosion by the Institute of Metals, Gran Bretaña, 1990.
8. Saborío, Erika; Rojas, Randall. Evaluación y Diagnóstico del Estado de Corrosión de la Torre de Enfriamiento de Miravalles I. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura. (Documento no Publicado), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Diciembre, 2003.
9. RILEM CPC-18 "Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth," Materials and Structures, Volumen 21, Número 126, 1998.
10. UNE 112-011-94.- "Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Hormigones Endurecidos y Puestos en Servicio," Norma Española.
11. ASTM C 1152 "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," American Society for Testing and Materials, EUA, 1997.
12. ASTM C 1411 "Standard Test Methods for water-soluble Chlorides present as Admixes in Graded Aggregate Road Mixes," American Society for Testing and Materials, EUA, 2000.

13.ISO 9223 “Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres classification,” ISO, 1992.